



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Impresión 3D aplicado a estructuras

Autor/es

SERGIO CALVO SIMÓN

Director/es

LUIS CELORRIO BARRAGUÉ

Facultad

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Departamento

INGENIERÍA MECÁNICA

Curso académico

2018-19



Impresión 3D aplicado a estructuras, de SERGIO CALVO SIMÓN
(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative
Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los
titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

CURSO: 2018/2019

CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE

TÍTULO:

Impresión 3D aplicada a estructuras

AUTOR: Sergio Calvo Simón

DIRECTOR/ES: Luis Celorrio Barragué

DEPARTAMENTO: Ingeniería Mecánica

MEMORIA

Trabajo Fin de Grado

Sergio Calvo Simón

RESUMEN

Este proyecto trata de ayudar y mejorar la experiencia de las personas a la hora de conocer el campo de la resistencia de materiales y las estructuras con ayuda de la impresión 3D. Se trata de generar prácticas divulgativas que puedan ser llevadas a cabo en el ámbito docente, y que solo pueden hacerse realidad con el apoyo de esta nueva herramienta.

La adquisición de conocimientos en la impresión 3D, así como descubrir cuál es su desarrollo actual en los diversos campos de la tecnología, es algo que también se aborda en este proyecto de forma paralela a la ejecución de las prácticas con estructuras.

El proyecto consta de varias prácticas diferenciadas. Comenzando por un ensayo de tracción donde se generan las probetas del material adecuado y mediante una máquina de tracción universal, se ensayan hasta rotura y los datos se gestionan con varios programas, hasta obtener las características del material, necesarias para el posterior cálculo en estructuras formadas por estos materiales.

El apartado más importante es el diseño de pórticos, de diferentes dimensiones y materiales, y su posterior ensayo tanto de forma teórica (SolidWorks) como de forma real (ensayadas en el laboratorio). Una vez realizados los ensayos se redactan las conclusiones y resultados que, según los datos obtenidos, parecen más oportunas.

En otro punto se generan estructuras de nudos articulados, con piezas provenientes de sitios webs docentes de acceso libre, que aportarán multitud de posibilidades de diseño y optimización.

Por último, se generan varios modelos con la impresión 3D para su visualización, como son uniones atornilladas y una viga de hormigón arado. Con ello se pretende dar un punto extra de realismo a la hora de conocer estas soluciones industriales.

En definitiva, se trata de generar una guía explicativa de diversas actividades, para que cualquier usuario dentro del mundo de la ingeniería pueda conocer de una forma innovadora, eficaz y entretenida, el mundo de las estructuras, siguiendo los pasos que se conforman en el presente proyecto.

ABSTRACT

This Project tries to help and improve the experience of people who want to know about field of resistance of materials and structures with 3D printing. It is about creating divulgative practices that could be carried out in an educational environment and be accomplished by the usage of this new tool.

The acquisition of knowledge in 3D printing as well as discovering its current development in other fields of technology is also addressed in this project all together with implementation of practices with structures.

The project consists of several differentiated practices. Beginning with a tensile test where the specimens of the suitable material are generated and by means of a universal test machine, they are tested until breaking point and the data are managed with several programs, until obtaining the characteristics of the material, necessary for the subsequent calculation in structures formed for these materials.

The most important section is the design of frames, of different dimensions and materials, and their subsequent testing both in a theoretical (SolidWorks) and in a real way (tested in the laboratory). Once the tests are done, the conclusions and results are drawn up which, according to the data obtained, seem more appropriate.

In another point articulated knot structures are generated, with pieces coming from free access teaching websites, which will provide a multitude of design and optimization possibilities.

Finally, several models are generated with 3D printing for viewing, such as bolted joints and a plowed concrete beam. This is intended to give an extra point of realism when it comes to knowing these industrial solutions.

To sum up, it is about creating an explanatory guide to various activities, so that any engineering user can learn the world of structures in an innovative, effective and entertaining way, following the steps that have been set in this project.

Contenido de la Memoria

1. Objeto.....	12
2. Alcance	12
3. Antecedentes	13
4. Aplicación de la impresión 3D.....	13
4.1 Aplicaciones en ocio (sin finalidad técnica)	13
4.2 Aplicaciones en la Educación	16
4.3 Aplicaciones en ingeniería	18
Plástico	18
Metal	18
4.4 Aplicaciones en arquitectura	19
4.5 Aplicaciones en Medicina	20
4.6 Aplicaciones en el sector alimenticio.....	21
5. Aplicación de la impresión 3D en el proyecto.....	22
6. Materiales y programas informáticos utilizados.....	22
6.1 Hardware	23
Impresoras:.....	23
Rollo de filamento para impresión:.....	25
6.2 Software.....	27
Solidworks:	27
Cura:	28
Slic3r	28
MD Solids.....	29
6.3 Elementos de fijación.....	30
Sargentos de mesa	30
Soporte calibre	30
6.4 Elementos de medición de desplazamientos.	30
Calibre de Reloj:	30
6.5 Elementos para la aplicación de cargas.....	31
Soporte y pesas	31
7. Bases teóricas para la realización del proyecto.	32
7.1 Bases teóricas para los ensayos de tracción.....	38
8. Elaboración de los diseños a ensayar.....	40

9.	Bases técnicas para la realización del proyecto.....	43
10.	Ensayo de tracción en las probetas.....	46
10.1	Procedimiento para ensayar las probetas.....	48
10.2	Obtención de los datos necesarios.....	48
11.	Ensayos de los pórticos 3D.....	57
11.1	Introducción al ensayo de los Pórticos.....	57
11.2	Análisis dimensional.....	61
11.3	Compensación de la fuerza del muelle del calibre.....	61
11.4	Aplicación de cargas.....	63
11.5	Resolución en “SolidWorks” del pórtico base.....	66
11.6	Comparación de los resultados reales frente a los teóricos.....	76
11.7	Ensayos de los pórticos con diferentes modificaciones de cotas.....	78
	Pórticos con L=100mm y H=8mm.....	78
	Pórticos con L=50mm y H=2mm.....	83
	Pórticos con L=50mm y H=08mm.....	88
	Pórticos con L=150mm y H=2mm.....	93
	Pórticos con L=150mm y H=8mm.....	97
11.8	Nuevos diseños para mejorar las estructuras.....	102
	Pórtico modificado 1 (diagonal).....	102
	Pórtico modificado 2 (viga intermedia).....	106
	Conclusiones de la modificación de pórticos.....	109
12.	Estructuras de nudos articulados.....	110
13.	Aplicación de la impresión 3D para la visualización de detalles constructivos.....	113
13.1	Uniones de perfiles.....	113
13.2	Modelo de viga armada.....	115
14.	Conclusiones finales del proyecto.....	117
15.	Bibliografía.....	118
	Tabla 1: Posibles materiales para la impresión 3D con impresoras tipo PRUSA.....	26
	Tabla 3: Esquema de resolución del método.....	33
	Tabla 4: Resultados tracción probeta 1 PLA.....	51
	Tabla 5: Comparación de características PLA.....	52
	Tabla 6: Resultados ensayo probeta 2 PLA.....	53
	Tabla 7: Comparación final del ensayo de tracción en PLA.....	53

Tabla 8: Resultados ensayo probeta 1 ABS	54
Tabla 9: Resultados ensayo probeta 2 ABS	55
Tabla 10: Resultados ensayo probeta 3 ABS	56
Tabla 11: Comparación de resultados del ensayo de tracción en ABS	56
Tabla 12: Recopilación de datos de la fuerza del muelle	62
Tabla 13: Gráfico de la fuerza ejercida por el muelle.....	62
Tabla 14: Comparativa entre pórticos L=100mm H=02mm	66
Tabla 15: Comparación de resultados teóricos y prácticos para el pórtico de referencia	77
Tabla 16: Comparación pórticos 100x08.....	80
Tabla 17: Comparación ensayos pórticos 50x02	85
Tabla 18: Comparación de resultados pórticos (50x08):.....	90
Tabla 19: Comparación entre pórticos 150x02	95
Tabla 20: Comparación de pórticos 150x08	99
Tabla 21: Comparación pórtico modificado 1 vs 100x08	104
Tabla 22: Comparación entre modelos modificados y original (100x08)	109
Ilustración 1: Ejemplos de impresión 3D con PRUSA	14
Ilustración 2: Diseño de prótesis en 3D.....	15
Ilustración 3: Impresora fabricada con el método "RepRap"	16
Ilustración 4: Implementación del 3D en aulas infantiles	17
Ilustración 5: Ejemplo de funcionamiento de "DIBUPRINT3D"	17
Ilustración 6: Ejemplos de aplicaciones del 3D en Universidades.....	18
Ilustración 7: Ejemplo de piezas en metal de la empresa ADDIMEN.....	19
Ilustración 8: Aumento de la tecnología 3D en el metal. Informe Wohlers	19
Ilustración 9: Maqueta de arquitectura con impresión 3D	20
Ilustración 10: Puente impreso en 3D	20
Ilustración 11: Primer corazón impreso en 3D.....	21
Ilustración 12: Impresión de chocolate con impresoras 3D.....	22
Ilustración 13: Galardones obtenidos por las impresoras PRUSA.....	23
Ilustración 14: Impresora PRUSA 3.0s	24
Ilustración 15: Impresora ULTIMAKER 3	24
Ilustración 16: Filamento de PLA.....	26
Ilustración 17: Filamento de ABS.....	26
Ilustración 18: Marca/Logo SolidWorks	27
Ilustración 19: Logo Cura	28
Ilustración 20: Interface de Slic3r.....	29
Ilustración 21: Pantalla de menú de MD Solid	29
Ilustración 22: Sargentos utilizados en el proyecto	30
Ilustración 23: Soporte magnético para el calibre	30
Ilustración 24: Calibre utilizado en los ensayos	31
Ilustración 25: Soporte y pesas normalizadas en Newton	32
Ilustración 26: Esquema de las fuerzas resultantes en los pórticos.....	37

Ilustración 28: Gráfico tensión deformación tipo	39
Ilustración 29: Diseño 3D de la probeta	40
Ilustración 30: Comienzo de diseño del pórtico base	40
Ilustración 31: Taladros superiores	41
Ilustración 32: Suavizado de curva en los diseños	41
Ilustración 33: Vista 3D del pórtico base	41
Ilustración 34: Conjuntos de primeros diseños de pórticos.....	42
Ilustración 35: Pórticos modificados con elementos extra	43
Ilustración 36: Patrones de rellenos disponibles en Slic3r.....	44
Ilustración 37: Comparación de espesor de capa	45
Ilustración 38: Porcentajes de relleno (probetas UR-Maker)	45
Ilustración 39: Máquina universal de tracción UR	46
Ilustración 40: Probetas en ABS	47
Ilustración 41: Probetas en PLA.....	47
Ilustración 42: Pantalla del Software de máquina universal.....	47
Ilustración 43: Probetas tras el ensayo de tracción	48
Ilustración 44: Muestra de formato en .txt.....	49
Ilustración 45: Muestra de datos en Excel	49
Ilustración 46: Interface del programa MD Solid para los ensayos de tracción	50
Ilustración 47: Propiedades mecánicas del PLA según fabricante (PRUSA).....	52
Ilustración 48: Pórticos de L=50mm impresos en ABS y PLA	57
Ilustración 49: Pórticos de L=100mm impresos en ABS y PLA	58
Ilustración 50: Pórticos de L=150mm impresos en ABS y PLA	59
Ilustración 51: Pórtico de referencia en posición de ensayo	60
Ilustración 52: Toma de datos de la fuerza en [g] que ejerce el muelle del calibre a diferentes alturas.	62
Ilustración 53: Ensayo del pórtico L=100mm H=2mm (PLA) en el laboratorio	64
Ilustración 54: Ensayo del pórtico L=100mm H=2mm (ABS) en el laboratorio.....	65
Ilustración 55: Diseño abierto en SolidWorks	67
Ilustración 56: Especificación del material de la pieza	68
Ilustración 57: Cambio en el menú sobre el material	68
Ilustración 58: Selección de tipo de estudio	69
Ilustración 59: Opciones del estudio estático de la pieza	69
Ilustración 60: Propiedades de la malla de renderizado	70
Ilustración 61: Momento de fijar una cara (empotramiento).....	70
Ilustración 62: Momento de la aplicación de la carga virtual	71
Ilustración 63: Marcado de opción (en amarillo)	72
Ilustración 64: Cambios en la definición de los desplazamientos.....	73
Ilustración 65: Desplazamientos calculados en SolidWorks	73
Ilustración 66: Tensiones calculadas en SolidWorks	74
Ilustración 67: Progreso del comportamiento del pórtico a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)	75

Ilustración 68: Progreso del comportamiento del pórtico a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)	76
Ilustración 69: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en laboratorio (PLA).....	79
Ilustración 70: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS).....	80
Ilustración 71: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)	82
Ilustración 72: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)	82
Ilustración 73: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA).....	84
Ilustración 74: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)	85
Ilustración 75: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en SolidWorks(PLA)	86
Ilustración 76: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)	87
Ilustración 77: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA).....	89
Ilustración 78: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)	90
Ilustración 79: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)	91
Ilustración 80: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en SolidWorks(ABS)	92
Ilustración 81: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA).....	93
Ilustración 82: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS).....	94
Ilustración 83: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)	96
Ilustración 84: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)	97
Ilustración 85: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en Laboratorio(PLA).....	98
Ilustración 86: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS).....	99
Ilustración 87: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)	100
Ilustración 88: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)	101
Ilustración 89: Pórtico modificado con miembro en diagonal	102

Ilustración 90: Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con diagonal) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)	103
Ilustración 91: Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con diagonal) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA).....	105
Ilustración 92: Pórtico modificado con viga intermedia	106
Ilustración 93: : Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con viga intermedia) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)	107
Ilustración 94: Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con viga intermedia) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)	108
Ilustración 95: Foto de la web Thingiverse.....	110
Ilustración 96: Aplicación de carga en el puente	111
Ilustración 97: Foto de un diseño modificado de la web Thingiverse.....	111
Ilustración 99: Pieza de uniones soldadas impresa en PLA.....	112
Ilustración 100: Pieza de uniones atornilladas impresas en PLA	113
Ilustración 101: Diseño de viga armada	115
Ilustración 102: Proceso de impresión de la viga armada (tiempo total: 19 horas)	116

1. Objeto

El objetivo principal del proyecto consiste en la generación de pórticos modelo mediante impresión 3D para su posterior estudio y demostración de las leyes físicas de la teoría de estructuras que aplican en el comportamiento de dichas estructuras al ser sometidas a diversas cargas conocidas. Se conformará el proyecto de forma que se pueda extraer de él un trabajo similar a una práctica que pudiese realizarse en un aula universitaria, y con toda la información necesaria para la orientación en el correcto desarrollo de dicha práctica.

También se generarán diseños que no van a ser ensayados mecánicamente, pero que para la comprensión visual de elementos característicos de las estructuras, serán muy útiles facilitando su aprendizaje frente a las imágenes de la enseñanza convencional.

Como un objetivo colateral al objeto principal, también se tratará de conocer las bases de la impresión 3D, historia y aplicaciones, desde un enfoque teórico práctico ya que para llegar a la construcción de los pórticos, será necesario un aprendizaje paralelo.

2. Alcance

El proyecto pretende obtener desde el punto de vista divulgativo una amplia noción de las estructuras enfocado de una forma muy práctica y visual que ayude a entender sus comportamientos al ser sometidos a cargas. Se trabajará a partir de multitud de diseños creados en impresión 3D, para comparar los resultados entre todas las muestras y obtener las conclusiones oportunas, o simplemente para conocer diferentes técnicas industriales como las uniones, con modelos reales a escala.

El presente proyecto interviene de una u otra forma en los siguientes aspectos y campos de conocimiento, que se muestran a continuación:

- El uso y manejo de la impresión 3D para generar los modelos.
- Conocer las aplicaciones de la impresión 3D tanto en el mundo de la resistencia de materiales como en la industria o en otro tipo de sectores.
- Exploración de la influencia de los parámetros teóricos de esfuerzos en estructuras.
- Optimización topológica en impresión 3D.
- Generar impresiones de uniones de elementos para visualización y comprensión.
- Obtención de diseños de estructuras de webs abiertas, para su ensamblaje y posterior manipulación.

En resumen, el principal objetivo de este proyecto es acercar el mundo real de las estructuras hacia los estudiantes por medio de la impresión 3D como puente de unión de la teoría de estructuras y resistencia de los materiales y los modelos prácticos que se generan en los proyectos de ingeniería. De tal modo, el proyecto se basa en el desarrollo

de conocimientos sobre el comportamiento de las estructuras desde un punto de vista divulgativo.

3. Antecedentes

La impresión 3D, o también llamada manufactura aditiva, se aplica hoy en día en diversos campos de la investigación y el desarrollo, y su rápido avance la convierte en una de las técnicas más interesantes de implantar en múltiples ramas del conocimiento como la medicina o la ingeniería.

En el año 1976 se comienza a trabajar y desarrollar la tecnología de la inyección, en este caso únicamente con tinta, y no fue hasta 1984 donde la tinta se sustituye por otros materiales que dan paso a lo que hoy se conoce como impresión 3D. Desde ese momento en el año 1984, donde sus limitadas aplicaciones podían hacer prever un uso irrelevante de dicha tecnología, hasta hoy en día, han pasado más de 3 décadas, tiempo más que suficiente para que gracias a los importantes avances y mejoras de la impresión 3D, hoy nadie pueda poner en duda el potencial de esta tecnología.

4. Aplicación de la impresión 3D

Para entender mejor el fenómeno de la impresión 3D, se estudian las formas de aplicación implantadas hoy en día, según los diferentes campos e industrias donde se introducen. Es destacable la diferencia entre ellas, puesto que obviamente el material a imprimir depende muchísimo de la finalidad y las necesidades de cada sector. Por ejemplo en la industria de la construcción se pueden ver estructuras impresas con hormigón, a diferencia que en medicina, que se realizan impresiones con células o con materiales especiales para prótesis como el cromo cobalto. La diferencia es abismal pero en ambos casos se trata de impresión 3D o fabricación aditiva.

En los próximos apartados se analiza la tecnología de impresión 3D según donde se encuentre implantada o hacia qué campo este orientada.

4.1 Aplicaciones en ocio (sin finalidad técnica)

Es la aplicación más extendida entre la población general, que puede obtener una impresora 3D en una tienda de informática y con ella imprimir objetos en PVC o similar.

Los objetos suelen ser figuras de decoración u otras formas sin un carácter técnico específico. Es una tecnología que no requiere demasiados conocimientos previos, con lo que lo hace muy accesible para todos. Además, gracias a las telecomunicaciones actuales, hay millones de usuarios que comparten sus experiencias y conocimientos en internet, incluso existen librerías con multitud de diseños predefinidos, listos para ser impresos en casa. Algunos ejemplos de estos productos se muestran en las siguientes imágenes:



Ilustración 1: Ejemplos de impresión 3D con PRUSA

La opción de personalizar cualquier diseño, la cantidad infinita de posibilidades que aporta una impresora 3D, hace que la gente de rienda suelta a su imaginación, y se consigan productos útiles, más allá de objetos meramente recreacionales o decorativos. Un ejemplo de ello son los diseños de prótesis, como los de Paul McCarthy, un hombre de Massachusetts, Estados Unidos que gracias a la impresión 3D consiguió crear una prótesis para su hijo de 12 años. Mediante tutoriales de “YouTube” y con ayuda de una impresora lo hizo posible como se puede ver a continuación:



Ilustración 2: Diseño de prótesis en 3D

De esta forma la impresión 3D accesible a todos, con un carácter lúdico como se describe en este punto, puede orientarse al campo de la ingeniería por la posibilidad de imprimir mecanismos y a su vez a la medicina puesto que esos diseños tienen una finalidad médica para uso de un paciente como se acaba de ver en este caso.

Otra opción útil y curiosa, es la capacidad de auto replicación que tienen las impresoras 3D comunes, con la cual los usuarios pueden crear otras máquinas 3D a partir de sus impresoras, con excepción claro, de componentes como motores, sistema electrónico o extrusor.

Incluso existen comunidades, llamadas “RepRap”, con grupos como el español “Clone Wars” que trata de recopilar en español información para poder construir una impresora 3D desde cualquier hogar.

La impresora que se observa en la siguiente imagen tiene varios componentes (en color amarillo y azul) creados a partir de otra impresora, de esta forma puede auto-replicarse tantas veces como se desee.

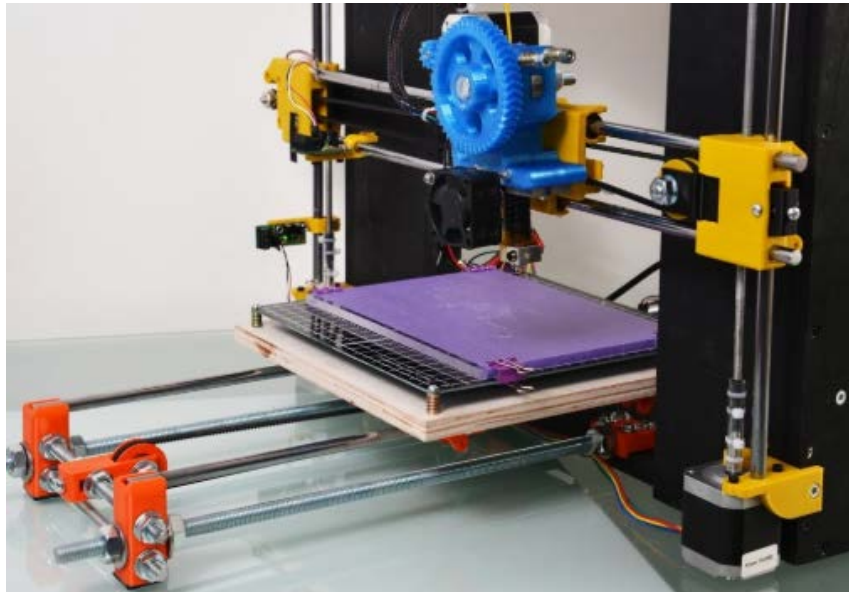


Ilustración 3: Impresora fabricada con el método "RepRap"

4.2 Aplicaciones en la Educación

No es casualidad que todas las Universidades y centros educativos hayan recientemente adquirido impresoras 3D entre sus herramientas educacionales, puesto que, como pretende reflejar este proyecto, es una fantástica forma de acercar al alumno diversas aptitudes y relacionar la vida real y práctica con la enseñanza aportada por los libros.

A continuación, se muestran ejemplos donde la impresión 3D ha tomado un papel importante a la vez que innovador en la educación y los beneficios que esto implica.

La capacidad que aporta la impresión 3D, de permitir a los alumnos llevar sus ideas a la realidad, convirtiendo diseños originales en modelos 3D crea en los niños, especialmente en tempranas edades, dota a los estudiantes de una herramienta perfecta para innovar, evaluar y corregir resultados. En España empresas como IT3D ha comenzado a instaurar las conocidas como aulas 3D en la que colaboran con los colegios a lo largo del territorio nacional para ayudarlos en la creación de espacios 3D, así como prestar el apoyo técnico que sea necesario en cada caso.



Ilustración 4: Implementación del 3D en aulas infantiles

Esta empresa Valenciana ha desarrollado también es software “DIBUPRINT3D” que ayuda a los alumnos más pequeños a iniciarse en el mundo de los software y modelados 3D.

Este software es capaz de llevar un dibujo 2D a un modelo en 3D:

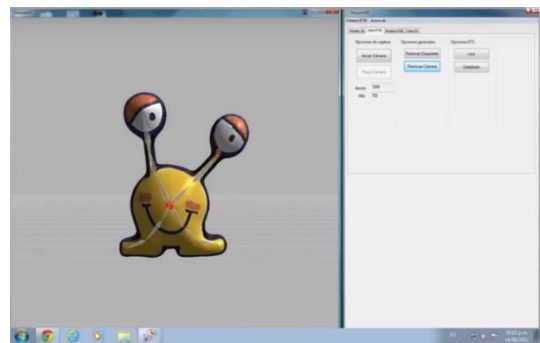


Ilustración 5: Ejemplo de funcionamiento de "DIBUPRINT3D"

En cursos más avanzados también puede intervenir de igual modo la impresión 3D de diversas formas, como por ejemplo en el desarrollo de ideas robóticas o en el modelaje y puesta en marcha de un motor de combustión.

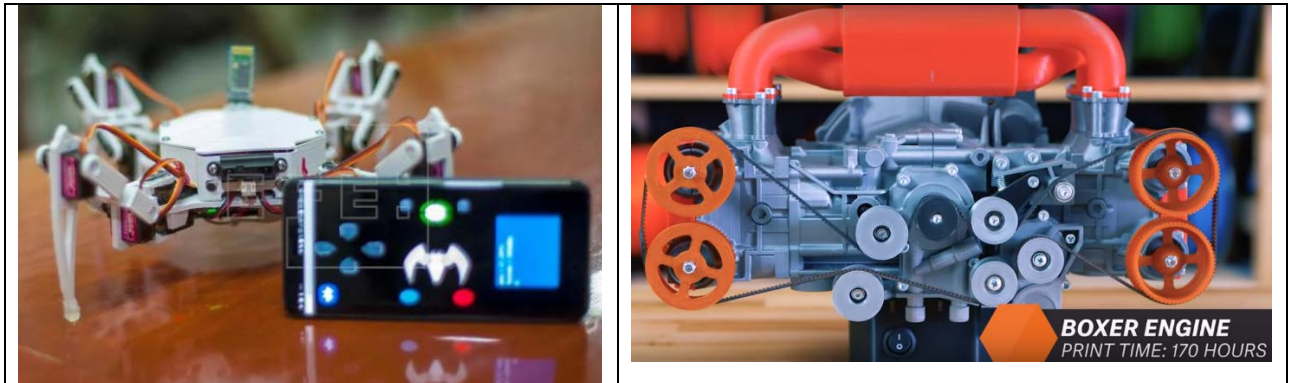


Ilustración 6: Ejemplos de aplicaciones del 3D en Universidades

4.3 Aplicaciones en ingeniería

Es el campo del que nació la impresión 3D y donde está implantado a un nivel superior al resto.

La posible impresión con diferentes materiales, hacen de la tecnología 3D una forma vanguardista de crear. Así pues, se pueden ver diseños destinados a todo tipo de aplicaciones.

Plástico

Los productos impresos en plástico suelen tener un carácter más de diseño y prototipado, puesto que existen multitud de procesos en serie como la inyección o el estampado, que permiten la producción en masa de objetos con una velocidad muchísimo más rápida que con la impresión 3D, es por ello por lo que se usa esencialmente en diseños preliminares y en la ayuda de la creación de nuevos productos. Los productos impresos en plástico rara vez adquieren un uso industrial dentro del funcionamiento de maquinaria.

Metal

Tecnología que nace en Alemania, y se está extendiendo por todo el mundo en la industria 4.0, aunque todavía se encuentra en desarrollo, con gran proyección de futuro, ya que proporciona una serie de ventajas frente a la industria tradicional.

Los metales se imprimen desde polvo, que mediante laser va soldando capas de este polvo una tras otra para formar el diseño requerido.

Se centra en el prototipado de diseños y en aportar soluciones a baja escala, pero no pretende hoy por hoy sustituir a otras tecnologías como el mecanizado. La posibilidad de imprimir cualquier tipo de diseño, sea cual sea su geometría, es el punto fuerte de esta tecnología.



Ilustración 7: Ejemplo de piezas en metal de la empresa ADDIMEN

Otras grandes ventajas son la eficiencia y la bajísima huella medioambiental que esta tecnología genera.

En los últimos años la fabricación aditiva de metal ha tenido un rápido ascenso, del 80% según el informe Wohlers en 2017 y se estima un ritmo similar en próximos años.

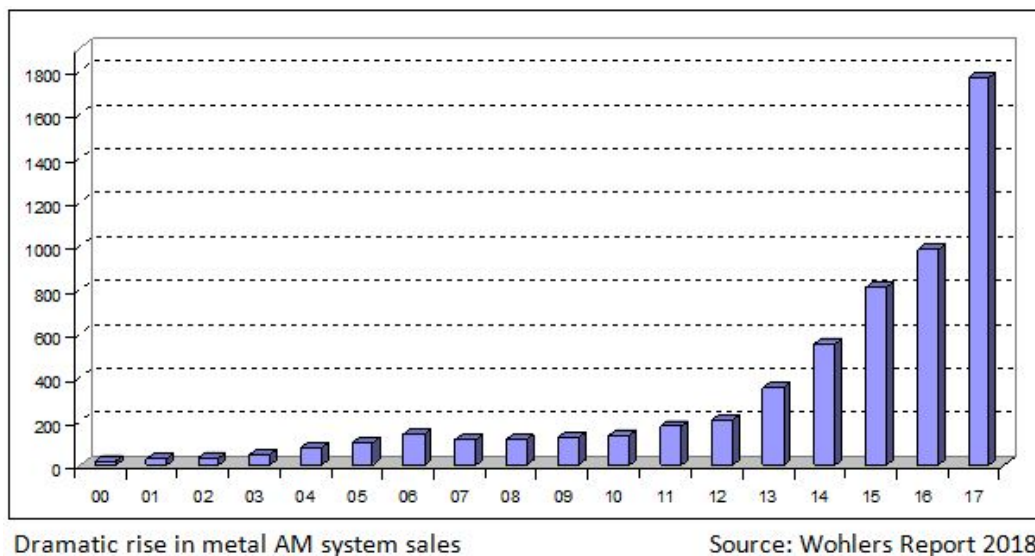


Ilustración 8: Aumento de la tecnología 3D en el metal. Informe Wohlers

4.4 Aplicaciones en arquitectura

En arquitectura también se comienzan a ver avances en impresión 3D, pero hay que diferenciar dos vertientes.

En primer lugar, la aplicación más “clásica” que puede dar lugar a maquetas y prototipos de edificios que antes tardarían meses en ser producidos, pueden llevarse a cabo en días o incluso en horas.



Ilustración 9: Maqueta de arquitectura con impresión 3D

La segunda, hablando ya de la construcción propiamente dicha, en la que los extrusores 3D pueden imprimir en hormigón o similares. Como el siguiente puente que se encuentra en la comunidad de Madrid, concretamente en Alcobendas.



Ilustración 10: Puente impreso en 3D

4.5 Aplicaciones en Medicina

Donde más ha incidido el mercado hoy por hoy, en España, es en la rama clínico dental, donde por medio de cromo cobalto, es posible imprimir piezas dentales personalizadas para los pacientes.

La característica del diseño personalizado que aporta la impresión 3D la hace muy propicia para la creación de prótesis de todo tipo que se ajusten a las necesidades específicas de cada paciente.

Además de las prótesis personalizadas e individualizadas por paciente, la aplicación de la impresión 3D va mucho más allá, puesto que no solo pueden imprimirse materiales como los mencionados para prótesis, sino que también es posible la impresión de

materia viva, es decir, la impresión de tejidos mediante células. Esta metodología es compleja pero su avance y los resultados ya obtenidos auguran un futuro prometedor.

Un caso actual muy relevante ha sido la creación de un corazón impreso en 3D con células del propio paciente. Este logro fue llevado a cabo por un grupo de científicos de la Universidad de Tel Aviv, el cual supone un salto cualitativo increíble en la medicina regenerativa, que ya era capaz de generar tejidos sin vasos sanguíneos. Este hito de la medicina y de la impresión 3D está repleto de celdas, venas y arterias y formando los ventrículos y aurículas propias del corazón. El proyecto es experimental y no es completamente funcional. Según estos expertos, esta prometedora técnica podría llegar a la realidad en trasplantes humanos en unos 10 años.



Ilustración 11: Primer corazón impreso en 3D.

4.6 Aplicaciones en el sector alimenticio

El campo de la alimentación también ve en la impresión 3D una forma de futuro para crear alimentos tal cual los conocemos hoy, que sirvan para general alimentos.

Así como se pretende generar órganos completos en el campo de la medicina, también se presenta la oportunidad, gracias a la impresión 3D, de que en un futuro las personas puedan imprimir alimentos tal y como los conocemos hoy en día, aptos para el consumo humano y con las mismas propiedades y nutrientes que los productos actuales.

En la práctica, hoy en día la impresión 3D se utiliza en la alimentación para experimentar con nuevas formas y diseño, imprimiendo por ejemplo Chocolate. Es el caso de la repostera ucraniana Dinara Kasko que utiliza la impresión 3D para diseñar sus postres con un aspecto único, ya que hace sus propios moldes y utensilios en 3D. Otro ejemplo

es la impresora CocolJet que permite directamente imprimir en 3D con chocolate y crear modelos únicos.

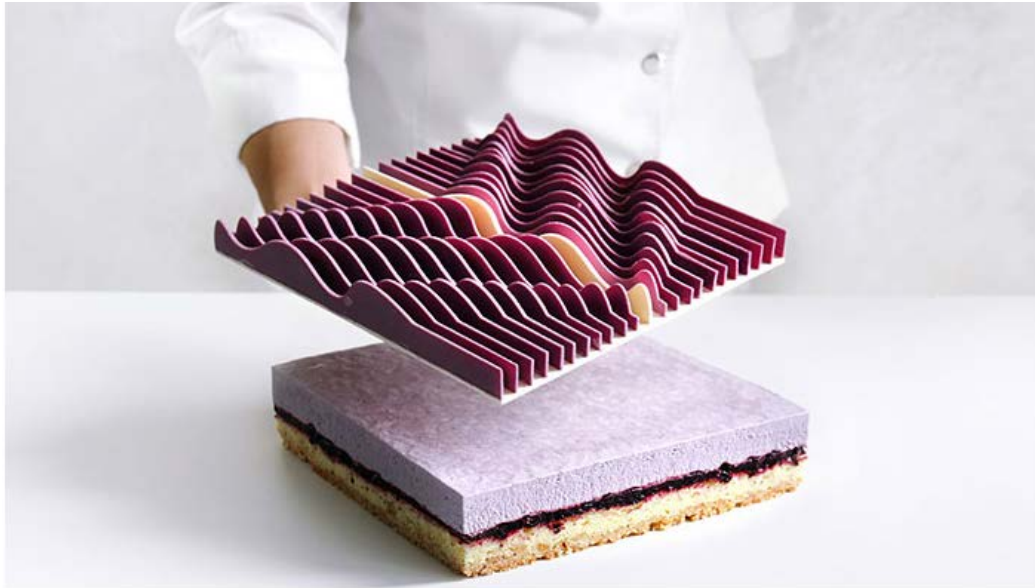


Ilustración 12: Impresión de chocolate con impresoras 3D

5. Aplicación de la impresión 3D en el proyecto

Los ensayos de laboratorio a realizar en el presente proyecto consisten en la aplicación de cargas definidas, a estructuras diseñadas e impresas en 3D, con la tecnología docente disponible. Tras los ensayos se analizarán los resultados obtenidos, se comparará con el método teórico y se aportarán las conclusiones oportunas en cada caso y las observaciones que se estimen de mayor relevancia.

Como este proyecto se centra en el ámbito académico, los materiales utilizados irán en concordancia a un presupuesto asequible para actividad docente.

Para otros aspectos a parte del ensayo de estructuras tipo pórtico, como sean uniones atornilladas, estructuras de nudos articulados o visualización de otro tipo de elementos, también se contará con el apoyo de la impresión 3D, incluso con impresiones a dos colores para una diferenciación más precisa de los elementos.

6. Materiales y programas informáticos utilizados

Para realizar los ensayos se necesitan multitud de recursos tanto previos, para generar las estructuras en 3D, como posteriores, para analizar los resultados del ensayo y aportar las conclusiones. A continuación, se detallan los componentes utilizados para el correcto desarrollo del proyecto.

Los recursos informáticos se dividen el Hardware y Software de la siguiente manera:

6.1 Hardware

Impresoras:

Se utilizan las impresoras de dos marcas diferentes. Por un lado, para casi la totalidad de los diseños, los dispositivos PRUSA, que se describirán con mayor precisión, y por otro lado, en las impresiones de dos colores, se utiliza un equipo de la marca ULTIMAKER.

PRUSA

La herramienta con la que se generan las impresiones es la impresora modelo 3D PRUSA, en concreto 3 dispositivos de diferentes versiones. Los modelos son: im2.5K, im3K y el último im3Ks.

La compañía PRUSA RESEARCH fundada por Josef Průša en 2009, el modelo im3Ks en concreto es del año 2019, con componentes originales tal y como la empresa la distribuye.

Dentro del mercado de impresoras hay cientos de modelos disponibles, destinados a una u otra función según las necesidades. Para lo que se requiere en este proyecto, y dentro de un ámbito educacional, PRUSA es una marca óptima tanto para docentes como para estudiantes que acapara multitud de premios recibidos en la industria de la impresión 3D.



Ilustración 13: Galardones obtenidos por las impresoras PRUSA

Sus principales características son:

- Capacidad de impresión de 11025 cm³ (25x21x21)
- Boquilla extrusora de 0,4mm para un filamento de 1,75mm
- Base calefactable automática con sensores de temperatura (incluido sensor de temperatura de la sala)
- Materiales soportados: PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Laywood, Laybrick, Nylon, Fibra de carbono, Policarbonatos, etc.



Ilustración 14: Impresora PRUSA 3.0s

ULTIMAKER

También se dispone de la impresora ULTIMAKER, concretamente el modelo 3 que permite la impresión simultánea en 2 colores diferentes. Solo se va a imprimir una pieza de este tipo, pero ya que puede ser una técnica interesante, más adelante se especificarán los pasos a dar para conseguir una impresión satisfactoria, principalmente a nivel de configuración de software.



Ilustración 15: Impresora ULTIMAKER 3

Rollo de filamento para impresión:

Para hacer posible la impresión se necesita un material de aportación con el que generar los modelos físicos. Como ya se mostró en anteriores apartados, según el ámbito de trabajo y las necesidades se utilizará un material adecuado. En este caso se trabaja con diferentes derivados del plástico (PLA y ABS).

Siguiendo la filosofía de este proyecto, cabría la posibilidad de elegir, con total libertad, otros materiales de igual modo para ser analizados y comparados entre sí. Se pueden consultar otros materiales, y sus ventajas y desventajas en la siguiente tabla:

Material	Ventajas	Desventajas
PLA	Facilidad de impresión Muy estable Velocidad de impresión elevada Biodegradable Material reciclable	Poca resistencia térmica Poca resistencia mecánica Sensible a la humedad
ABS	Conserva las propiedades a altas temperaturas Gran capacidad de mecanizado Resistente a ataques químicos Resistente a impactos	Experiencia en impresión 3D necesaria Se ve afectado por las corrientes de aire durante la impresión
HIPS	Resistencia elevada incluso a bajas temperaturas No necesita cama caliente Material reciclable Resistente a ácidos y bases Alta capacidad de mecanizado No desprende gases nocivos Buen aislante térmico Resistente al agua	No se puede utilizar para piezas destinadas a estar en la intemperie Empieza a deformarse a los 80°C
HDPE	Resistente a pegamentos y disolventes Larga vida útil Muy buena resistencia al impacto Excelente resistencia química y térmica Muy ligero	No es reciclable Dificultad de impresión El enfriamiento brusco provoca deformaciones
PVA	Soluble en agua Adhiere bien diferentes tipos de plásticos	A temperaturas altas reacciona químicamente y puede producir atascos en el extrusor

	Excelente material de apoyo	
PET	Alta transparencia Buena resistencia tanto química como térmica y a impactos Impermeable Alta capacidad de mecanizado Resistente a ácidos, bases y grasas	Levemente tóxico No es biodegradable Se vuelve endeble al superar los 70°C
NYLON	Gran resistencia a la fatiga Muy buena resistencia mecánica Alta temperatura de deformación	Difícil de imprimir Contracción al imprimirse muy alta Poca definición de detalles

Tabla 1: Posibles materiales para la impresión 3D con impresoras tipo PRUSA

Los materiales concretos que se han obtenido para este proyecto, se muestran a continuación de forma detallada.



Ilustración 16: Filamento de PLA



Ilustración 17: Filamento de ABS

PLA

Es el filamento usado comúnmente por la mayoría de usuarios de este tipo de impresoras estilo PRUSA. Es biodegradable y fácil de imprimir a la vez que robusto. Es una elección muy adecuada para objetos grandes gracias a la baja expansión térmica y para imprimir las partes más delgadas por su baja temperatura requerida para llegar a fundición. Este plástico tiene aplicaciones en multitud de mercados de la impresión 3D como en el textil, medicina o el empaquetado. Es un polímero permanente e inodoro.

El mayor inconveniente que posee el PLA es, que debido a todas las características citadas anteriormente, no es posible mecanizar las piezas impresas. Otra desventaja es su elevado precio de producción, pero debido a los avances en la fermentación de la

glucosa para obtener ácido láctico el precio de producción ha bajado considerablemente.

Su impresión es más sencilla porque no es completamente necesaria una cama caliente como el ABS.

ABS

También se va a imprimir con ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), que es un plástico muy resistente al impacto utilizado especialmente en la industria de la automoción. En el mundo de la impresión 3D es uno de los materiales más usados junto con el PLA aunque el ABS está más indicado para cuando es necesaria la exposición de la pieza a temperaturas extremas. El ABS es considerado un termoplástico amorfo ya que si se somete a temperaturas muy elevadas se vuelve flexible u cuando se enfría sufre un proceso de endurecimiento. Su elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes y que el PLA.

El ABS es opaco y puede ser de color oscuro o marfil, pero puede pigmentarse en la mayoría de los colores obteniéndose un buen acabado y sin ser tóxico.

Sus desventajas frente al PLA es que su precio es algo más elevado que el PLA, necesita cámara caliente, su temperatura de extrusión es más alta (260º) y sobre todo que requiere tapar la impresora con una caja o cámara de aire adecuada, para que las corrientes de aire no dañen la pieza en su proceso de impresión.

Como mejora más significativa frente al PLA es que las piezas pueden ser mecanizadas posteriormente a su proceso de impresión.

6.2 Software

Solidworks:

Es el programa de diseño 3D con el que se van a realizar todos los diseños 3D del presente proyecto. Se usa la versión "Education Edition". del año 2018.



Ilustración 18: Marca/Logo SolidWorks

Este programa es totalmente independiente de la Impresora puesto que no solo se destina a la impresión 3D sino a todo tipo de necesidades en el campo de la ingeniería y el diseño.

Los archivos se generan con extensión STL para poder importarlo a los programas como CURA o Slic3r que generan el archivo G-CODE propio de la impresión 3D.

Más allá del diseño, el programa SolidWorks permite el ensayo virtual de piezas, y será de gran ayuda para la comparativa de desplazamiento de pórticos teóricos, como se resolverá en dicho programa, con los resultados obtenidos en el laboratorio físico.

Cura:

Este Software abierto es muy fácil de usar ya que posee una interfaz muy clara e intuitiva. Es el software de referencia para las impresoras Ultimaker 3D pero también se puede usar para la mayoría del resto de impresoras. Se utiliza la versión 4.0.0. del software.

El programa CURA se utiliza para convertir el archivo proveniente de SolidWorks, en un archivo del tipo G-code, donde el programa renderiza la pieza y traza los movimientos necesarios del extrusor para generar la pieza en la impresora. A su vez proporciona múltiples variables a modificar, como el porcentaje de relleno, o el patrón a seguir en las partes macizas. También aporta información acerca de la operación de impresión como el tiempo de ejecución o los metros de filamento que se necesitan para la pieza que se desea imprimir.



Ilustración 19: Logo Cura

En el programa es posible crear configuraciones y guardarlas para generar piezas con los mismos ajustes en sucesivas impresiones.

Para el presente proyecto solo se utilizará CURA para impresiones a dos colores en una impresora Ultimaker.

Slic3r

Al igual que CURA, es un software abierto con las mismas funciones.

Se decide optar por Slic3r como programa referencia en la impresión de las piezas 3D. Esto se debe a que Slic3r tiene relación directa con las impresoras PRUSA y por tanto el software posee las características de impresión y las configuraciones propias de la

impresora que se va a utilizar en el proyecto, lo cual facilita las labores de impresión y garantiza un resultado óptimo en los acabados de las piezas.

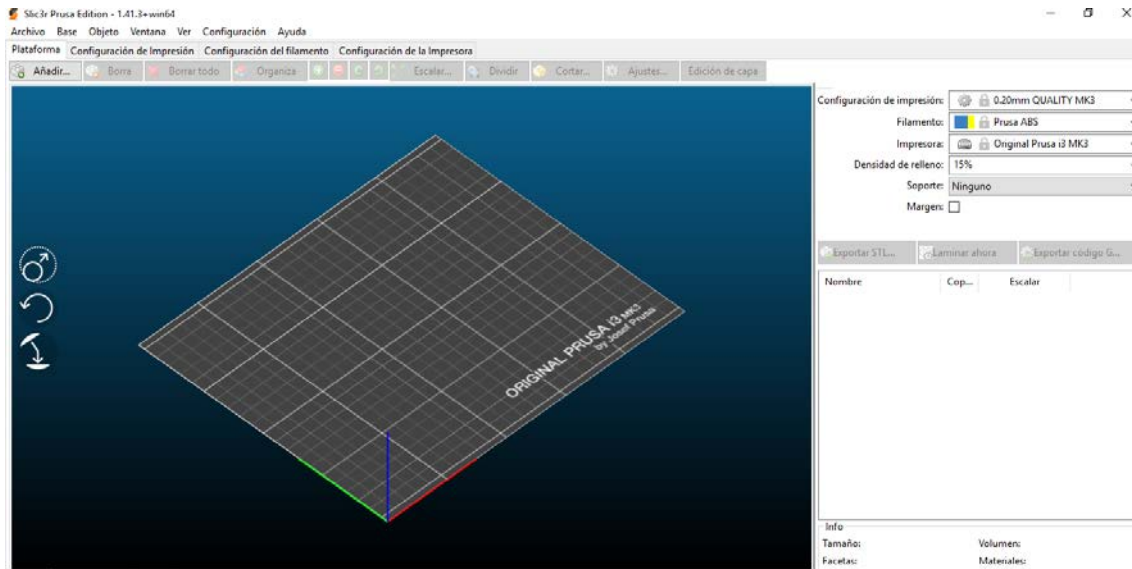


Ilustración 20: Interface de Slic3r

MD Solids

Es un software sobre los grandes temas de la mecánica de los materiales, normalmente enfocado a la parte civil, mecánica y aeroespacial de la ingeniería.

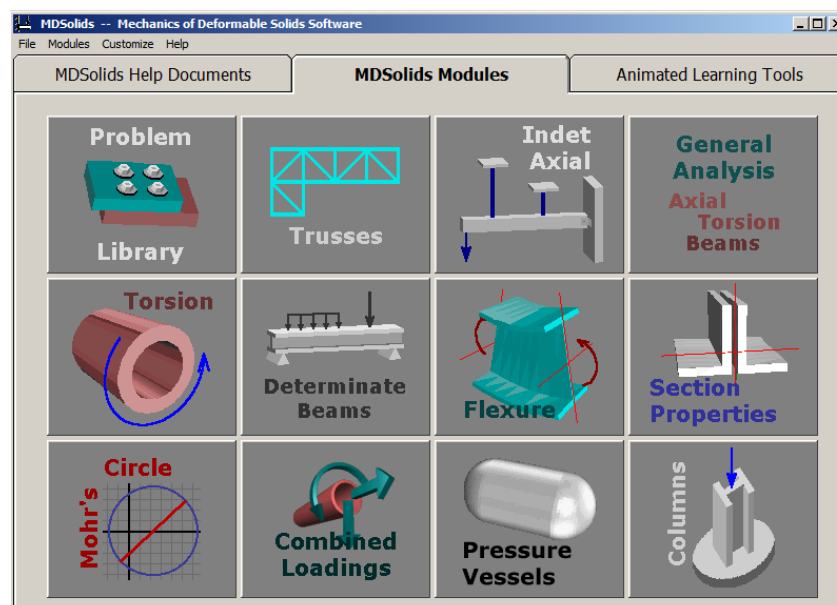


Ilustración 21: Pantalla de menú de MD Solid

MD Solids consiste en el análisis de vigas y columnas que soportan cargas y se comportan consecuentemente, por lo que se pueden encontrar ejercicios de flexión, compresión o torsión entre otros. Todo ello con explicaciones teóricas que se usan en la resolución de los problemas.

Para este proyecto se va a utilizar la parte referida a los ensayos de tracción deformación y el consecuente cálculo de las propiedades mecánicas de los materiales.

Para la realización física de los ensayos de necesitan diversas herramientas que se muestran a continuación:

6.3 Elementos de fijación

Sargentos de mesa

Para sujetar las estructuras a una superficie vertical se utilizan dos sargentos comunes, que garantizan un agarre óptimo dela estructura al marco. Esta herramienta va a facilitar una instalación rápida y segura.

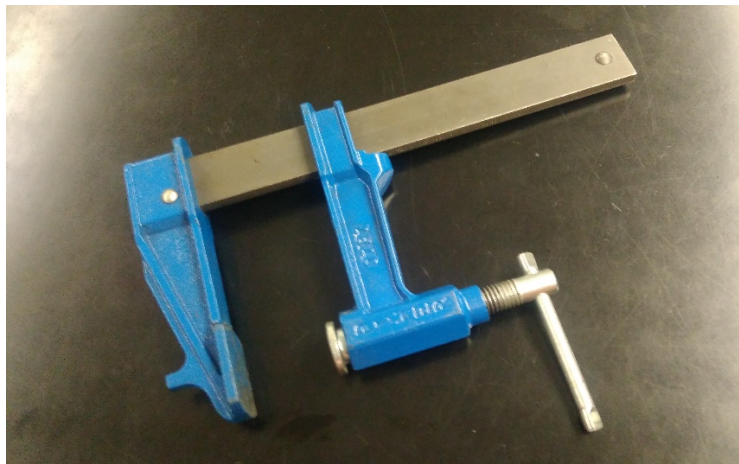


Ilustración 22: Sargentos utilizados en el proyecto

Soporte calibre

Para sujetar el calibre se va a utilizar la base imantada que tiene el soporte, ajustándolo a diferentes bases de metal para poder mover libremente la posición de la galga.



Ilustración 23: Soporte magnético para el calibre

6.4 Elementos de medición de desplazamientos.

Calibre de Reloj:

Se adquiere el calibre EOTECK modelo NTK021 con las siguientes características:

- Rango de medida: 0 – 26,3 mm
- Precisión de medida: 0.001mm
- Lectura del dato: Pantalla digital
- Unidades: pulgadas/mm



Ilustración 24: Calibre utilizado en los ensayos

6.5 Elementos para la aplicación de cargas

Una vez que el pórtico se asiente correctamente y quede perfectamente empotrado llega el momento de aplicar las cargas verticales, y para ello se van a usar los siguientes materiales.

Soporte y pesas

Se utiliza un artilingo que permite el acople de pesas perfectamente calibradas, y que tiene en su extremo superior un gancho que acopla perfectamente en los agujeros perforados de los diseños impresos, permitiendo así una rapidez notable en el cambio de pesajes.

El soporte está calibrado y su valor es de 1N, a tener en cuenta cuando se realice la combinación de las diferentes pesas hasta alcanzar el valor deseado.

Se utilizan pesas cilíndricas, de un peso determinado y conocido (viene acuñado en cada disco en Newton) y con la combinación de las mismas se consigue aplicar la fuerza deseada. De todas formas, han de ser pesadas previamente para comprobar su magnitud.

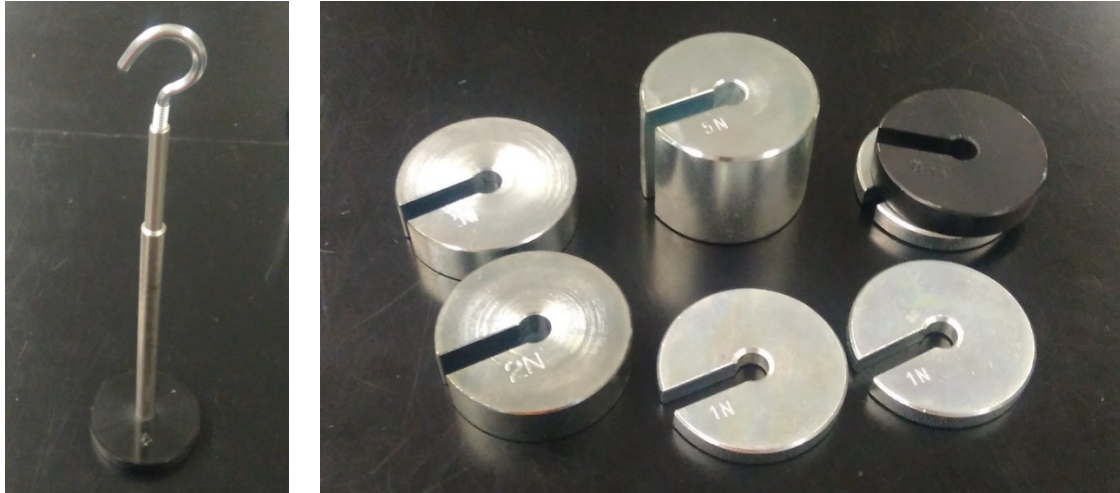


Ilustración 25: Soporte y pesas normalizadas en Newton

7. Bases teóricas para la realización del proyecto.

Los pórticos realizados van a ser estudiados simultáneamente de forma práctica, físicamente mediante los ensayos de laboratorio y de forma teórica, usando los diversos métodos de las estructuras, con el apoyo de programas informáticos que están basados en estos principios.

Para la resolución teórica de los pórticos los programas utilizan concretamente el Método de Equilibrio y el Método de Rigidez. El Método de Rigidez no es sino una formulación sistemática del Método de Equilibrio y se basa como tal en los tres principios de la Mecánica de Estructuras.

- **Compatibilidad:** La deformación de una función continua y tiene un valor único en cada punto. En consecuencia, los movimientos también lo son y los movimientos en los extremos de las piezas que concurren en un mismo nudo son idénticos para todas las piezas.
- **Equilibrio:** Tanto la estructura globalmente como cada parte de la misma y, en particular, cada nudo y pieza de la misma están en equilibrio estático, bajo la acción de las fuerzas exteriores y de los esfuerzos internos.
- **Sistema de ecuaciones del comportamiento del material.** La estructura se comporta linealmente tanto a nivel local (relación tensión-deformación, según la Ley de Hooke), como a nivel global (relaciones desplazamiento-deformación y fuerzas-tensiones, según la hipótesis de pequeños movimientos). En virtud de esta linealidad, es válido el principio de superposición. Por tanto, se establece un sistema de ecuaciones fácilmente simplificable del que se obtendrán las incógnitas que el sistema presente.

El esquema de resolución se muestra en el siguiente esquema. Como se observa, el proceso es secuencial y consiste en:

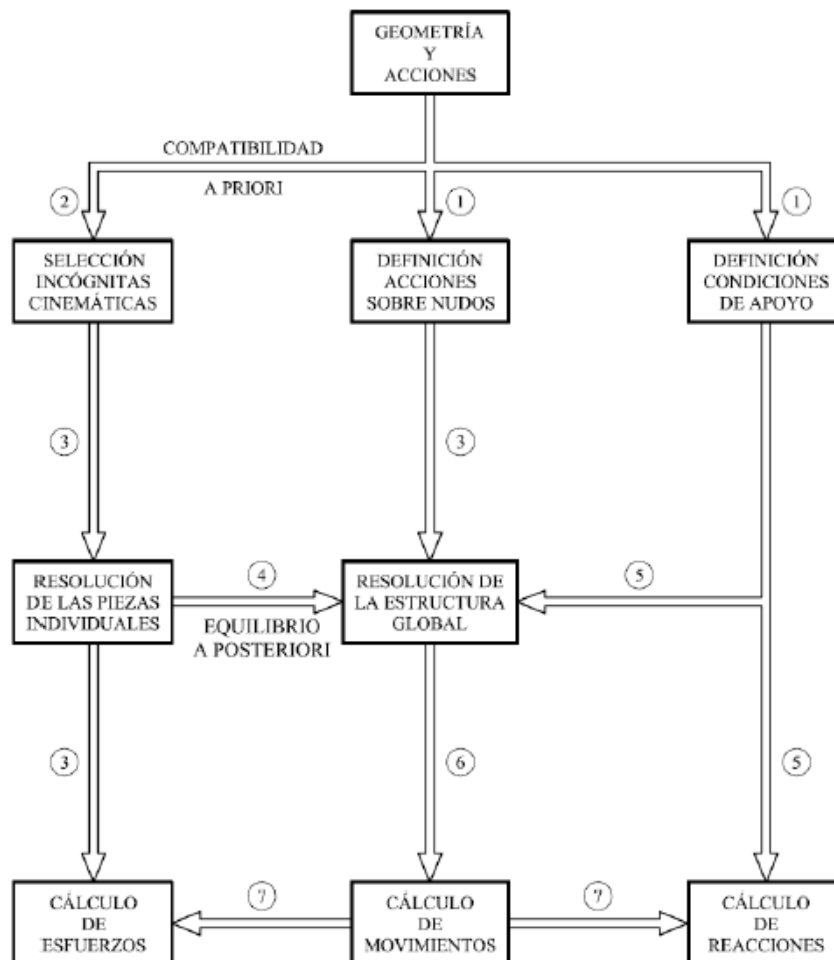


Tabla 2: Esquema de resolución del método

Siendo:

1. definir la geometría de la estructura y las acciones, así como las condiciones de apoyo.
2. identificar el número de movimientos incógnita que determinan la deformación de la estructura, a base de considerar las correspondientes condiciones de compatibilidad en los nudos.
3. resolver las piezas individuales, en función de los movimientos de sus extremos, a base de satisfacer las condiciones de equilibrio y compatibilidad en las piezas.
4. imponer las necesarias condiciones de equilibrio en los nudos.
5. imponer las condiciones de apoyo de la estructura.

6. determinar los movimientos incógnita, a base de resolver el sistema de ecuaciones resultante.

7. determinar los esfuerzos y reacciones en la estructura.

La definición de la geometría debe hacerse, necesariamente, de manera "digital", para que se pueda operar con ella fácilmente de forma algorítmica. La definición de las acciones debe ser general, de manera que se puedan considerar la enorme variedad de cargas y acciones que pueden actuar sobre la estructura. Deben definirse también, en forma general, las condiciones de apoyo. En el caso del proyecto en su mayoría contiene apoyos empotrados lo cual facilita su resolución.

Esta identificación es trivial, ya que se consideran como movimientos incógnita todos los movimientos desconocidos de los nudos de la estructura, es decir, que el número de incógnitas cinemáticas es k :

$$k = gl \cdot nn - ca$$

Donde:

gl : es el número de grados de libertad a considerar por nudo

nn : es el número de nudos de la estructura

ca : es el número de grados de libertad prescritos por las condiciones de apoyo.

En estructuras reticuladas de plano medio $gl = 3$, dos traslaciones en el plano de la estructura y un giro perpendicular a éste, en articuladas planas $gl = 2$, dos traslaciones en el plano de la estructura y en emparrillados planos $gl = 3$, dos giros en el plano de la estructura y un desplazamiento perpendicular a éste. En estructuras reticuladas espaciales $gl = 6$, tres traslaciones y tres giros y en articuladas espaciales $gl = 3$, tres traslaciones en el espacio.

Habitualmente, no se desprecia la deformación por axil de las piezas, aunque sí suele despreciarse la deformación por cortante. Esto implica que hay que considerar, explícitamente, las ecuaciones elásticas referidas a los axiles y los movimientos longitudinales de los nudos de las piezas. A la forma matricial de las ecuaciones elásticas "completas" se le llama matriz de rigidez de la pieza.

Al tomar como incógnitas todos los movimientos de los nudos, es necesario plantear, de forma sistemática, ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos en todos los nudos. A este proceso se le llama "ensamblaje" de la matriz de rigidez global.

Al imponer las condiciones de apoyo, se identifican los movimientos prescritos y sus correspondientes reacciones incógnitas. Dado que el número de incógnitas del problema suele ser elevado, los sistemas de ecuaciones resultantes son grandes. Es preciso, por tanto, disponer de sistemas robustos y potentes para el almacenaje y la resolución de sistemas lineales de ecuaciones.

Al calcular los esfuerzos y reacciones sobre la estructura, hay que tener en cuenta la definición original de las acciones, lo cual requiere, una cierta elaboración posterior a la obtención de los movimientos.

Históricamente, la enseñanza del análisis estructural procedió de elementos articulados porque muy a menudo simplifican la analítica. Pero ahora la mayoría de las conexiones estructurales son rígidas (por ejemplo, estructuras soldadas) y utilizan técnicas computacionales como la matriz de rigidez.

Para explorar un poco más lejos, se considera un pórtico plano, que consta de dos columnas verticales que son sujetados en sus extremos inferiores y conectados (a través de transmisión de momento juntas) a una viga horizontal como se muestra en la “Ilustración 26”

Asumiendo que las longitudes L y la rigidez a la flexión EI son las mismas para todos miembros, y que el marco está sujeto a una sola carga horizontal en una de las esquinas, podemos anotar el conjunto de ecuaciones de equilibrio para la estructura:

$$\begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = EI/L^3 \begin{bmatrix} (AL^2/I + 12) & 0 & 6L & -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & (AL^2/I + 12) & 6L & 0 & -12 & 6L \\ 6L & 6L & 8L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & (AL^2/I + 12) & 8 & 6L \\ 0 & -12 & -6L & 8 & (AL^2/I + 12) & -6L \\ 0 & 6L & 2L^2 & 6L & -6L & 8L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ \theta_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

Ecuación (1)

Cuando se tenga la hipótesis de una estructura en la que la viga cambia de espesor respecto a las columnas y se cuadruplica su tamaño (de 2mm de espesor a 8mm) se modifica la matriz, de tal modo que se tiene en cuenta la diferencia de entre $I_c = I_{columna}$ e $I_v = I_{viga}$ como se mostrará en los siguientes apartados.

En la que $(X; Y; \theta)$ son coordenadas globales, relativas a la parte de la esquina inferior izquierda del pórtico. La matriz de rigidez del elemento para una columna en coordenadas globales se puede describir como

$$\begin{aligned}
 k(1,1) &= k(4,4) = -k(1,4) = -k(4,1) = (EA/L)C^2 + (12EI/L^3)S^2 \\
 k(1,2) &= k(2,1) = -k(1,5) = -k(5,1) = -k(2,4) = -k(4,2) \\
 &= k(4,5) = k(5,4) = (EA/L)CS - (12EI/L^3)CS \\
 k(1,3) &= k(3,1) = k(1,6) = k(6,1) = -k(3,4) = -k(4,3) \\
 &= -k(4,6) = -k(6,4) = -(6EI/L^2)S \\
 k(2,2) &= k(5,5) = -k(2,5) = -k(5,2) = (EA/L)S^2 + (12EI/L^3)C^2 \\
 k(2,3) &= k(3,2) = k(2,6) = k(6,2) = -k(3,5) \\
 &= -k(5,3) = -k(5,6) = -k(6,5) = (6EI/L)C \\
 k(3,3) &= k(6,6) = 4EI/L \\
 k(3,6) &= k(6,3) = 2EI/L
 \end{aligned}$$

Ecuación (2)

En donde $C = \cos\theta$ y $S = \sin\theta$, donde θ es el ángulo (considerando positivo el sentido de las agujas del reloj) entre el miembro al pasar de coordenadas locales a globales.

Ahora se asume una dimensión del pórtico global (relevante para las dimensiones físicas que se imprimirán en 3D más adelante) de $L = 0,1\text{m}$, y un área de sección transversal $(b \times d) = (0.01 \times 0.002)$, se obtiene un área de $A = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, cuyo momento del área es $I = 6.67 \times 10^{-12} \text{ m}^4$, y así, $\frac{AL^2}{I} \equiv (L/r)^2 = 30 \times 10^3$, donde “ r ” es el radio de giro.

Estos parámetros se relacionan con una geometría que puede ser considerada muy flexible, y esto facilita mediciones relativamente fáciles.

En el análisis, los grados efectivos de libertad pueden reducirse si se examinan las magnitudes relativas de cada elemento y se aplican las condiciones de simetría oportunas.

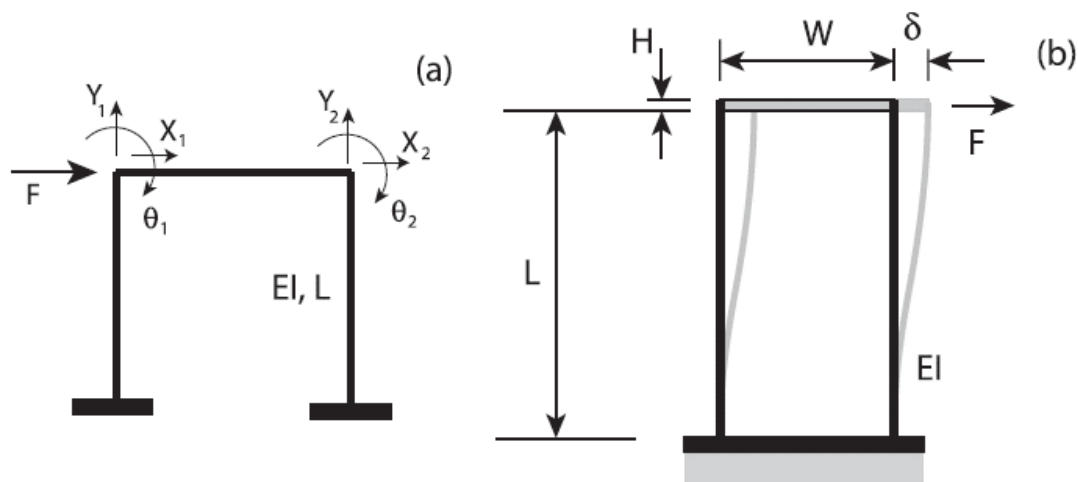


Ilustración 26: Esquema de las fuerzas resultantes en los pórticos

- a) Pórtico simple en el que las vigas son idénticas a las columnas
- b) El diseño base que se realiza con las cotas significativas (L y H son las que variarán)

Resolviendo el conjunto de ecuaciones simultáneas lineales, *Ecuación (1)*, se obtiene la desviación de oscilación dominante: $X_1 = 4.466F$ con ninguna diferencia importante con X_2 como era de esperar debido a su geometría. Se hablará de desplazamiento vertical indistintamente de si se habla del punto X_1 o X_2 .

Además, las deflexiones verticales en Y son cero. Dados los valores específicos utilizados en el ejemplo. Se obtiene un desplazamiento al aplicar la carga de aproximadamente $FL^3/(16.79EI)$

Resolver una matriz 6x6 de ecuaciones simultáneas es una tarea relativamente simple (gracias a programas como Matlab) pero no como cálculo manual, a pesar del hecho de que algunas de las deflexiones resultantes son bastante pequeñas (h) y muy pequeñas (Y).

Simplificando los cálculos, asumiendo que los elementos del marco son axialmente rígidos (en relación con la rigidez a la flexión), y que la rigidez de la viga horizontal es relativamente grande (en comparación con las columnas), luego la desviación de la oscilación del pórtico es efectivamente de un solo grado de libertad caracterizado por $F = \left(2 \times \frac{12EI}{L^3}\right) \delta$, es decir, ocho veces más rígido que el resultado conocido del voladizo (ahora tiene dos miembros cada uno efectivamente restringido contra la rotación en ambos extremos), y aproximadamente un 43% más rígido que el análisis anterior en el que la viga tenía la misma rigidez a la flexión (y longitud) que las columnas. Pero ahora la reducción a un GDL permite una investigación más sistemática de rigidez en términos de parámetros "de fácil ajuste o medida" de un sistema estructural. Este es un contexto ideal para muestras impresas en 3D.

Proporcionar un aumento práctico a la introducción de modelado elástico por flexión incluyendo el método de rigidez para el pórtico cuadrado se puede evaluar la precisión de la aproximación pura del desplazamiento variando la rigidez del travesaño relativo a las columnas. En el caso general esto implicar la longitud de la viga, pero para el pórtico cuadrado se puede hacer una comparación válida utilizando la relación $I_b = I_c$.

La siguiente imagen resume la rigidez resultante del desplazamiento. La rigidez no está dimensionada a escala real.

Resumiendo, $I_b = I_c$ se podía haber utilizado para el desplazamiento puro con la misma facilidad. En cualquier caso, se nota la influencia del aumento de grosor de la viga que ocurre efectivamente para $I_b/I_c \approx > 8$, correspondiente a una sección transversal rectangular en la que la viga es dos veces más gruesa que las columnas. Del mismo modo un marco con igual rigidez de flexión (EI) en las vigas y columnas también puede ser utilizado para evaluar la influencia de L_b/L_c en el comportamiento de la deformación. La matriz general de rigidez de la estructura para un pórtico se muestra a continuación:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$$

Donde cada k_{xx} se refier a las siguientes expresiones:

$$k_{11} = \begin{bmatrix} (AE/L)_B + 12(EI/L^3)_C & 0 & 6(EI/L^2)_C \\ 0 & (AE/L)_C + 12(EI/L^3)_B & 6(EI/L^2)_B \\ 6(EI/L^2)_B & 6(EI/L^2)_B & 4(EI/L)_B + 4(EI/L)_C \end{bmatrix},$$

$$k_{12} = k_{21}^T = \begin{bmatrix} -(AE/L)_B & 0 & 0 \\ 0 & -12(EI/L^3)_B & 6(EI/L^2)_B \\ 0 & -6(EI/L^2)_B & 2(EI/L)_B \end{bmatrix},$$

$$k_{22} = \begin{bmatrix} (AE/L)_B + 12(EI/L^3)_C & 0 & 6(EI/L^2)_C \\ 0 & (AE/L)_C + 12(EI/L^3)_B & -6(EI/L^2)_B \\ 6(EI/L^2)_B & -6(EI/L^2)_B & 4(EI/L)_B + 4(EI/L)_C \end{bmatrix}.$$

Ecuación (3)

En donde el subíndice B y C se refieren a:

B=beam=viga

C=column=columna

7.1 Bases teóricas para los ensayos de tracción

Para los ensayos a desarrollar en la máquina de tracción universal, se necesitan tener las nociones básicas de cómo funciona el ensayo y la manera correcta de obtener los datos que son interesantes y necesarios para posteriores cálculos en el programa MD Solids.

El ensayo de tracción genera en el ordenador vinculado el típico gráfico de Fuerza desplazamiento con la siguiente forma:

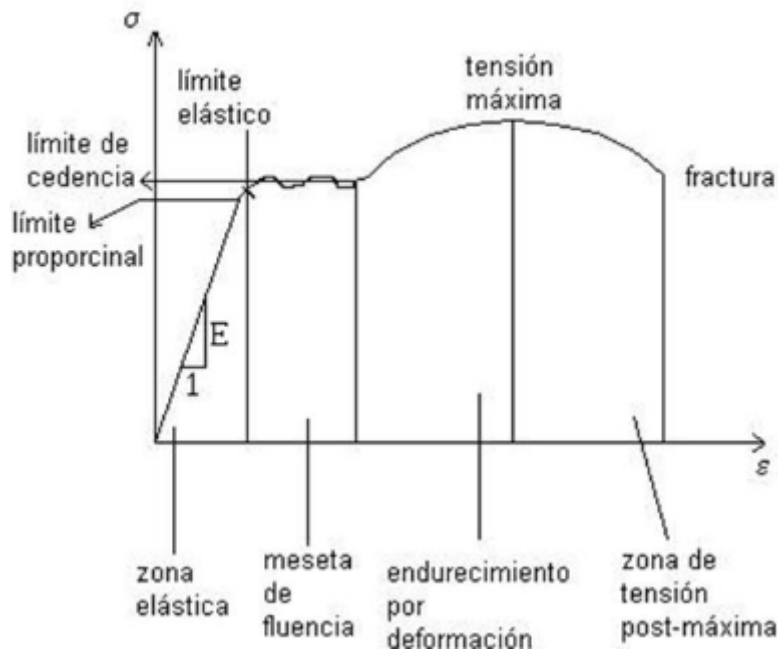


Ilustración 27: Gráfico tensión deformación tipo

Es necesario cambiar las unidades del Gráfico para obtener Tensión en [MPa] en el eje de abscisas y Deformación $[\varepsilon]$ en el eje de ordenadas.

Se necesita, previamente a la prueba, conocer el área $[S]$ y longitud inicial $[L_0]$ útiles de la probeta expuesta al ensayo.

Para el cambio de unidades se utilizan las siguientes transformaciones:

- $F [Kg] \rightarrow (\times 9,8067) \rightarrow N \rightarrow \text{Ans}/[S](m^2) \rightarrow \text{Ans}/10^6 \rightarrow \sigma [MPa]$
- $\delta [mm] \rightarrow / S [mm] \rightarrow \varepsilon (\text{adimensional})$

La fórmula que se utiliza para la obtención del Módulo Elástico es:

$$E = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Los resultados referentes a los ensayos de tracción serán obtenidos desde el software de la máquina de tracción universal, exportados a Excel desde un archivo .txt y procesados por el programa MD Solids finalmente.

8. Elaboración de los diseños a ensayar

Para la elaboración de los diseños se usa el programa informático SolidWorks. Los diseños que se van a generar para este proyecto son bastante sencillos y con unas nociones básicas de la aplicación pueden obtenerse fácilmente. A continuación, se describe el proceso a seguir para crear los diseños.

Se parte de un pórtico base, con dimensiones concretas, del que luego, variando sus cotas y levemente el diseño, se obtendrán el resto.

Una vez en Solidworks, en primer lugar, se generan los diseños de las probetas que se utilizarán en puntos posteriores de este proyecto con el fin de obtener datos de los materiales de impresión imprescindibles para el estudio de los pórticos a nivel teórico.

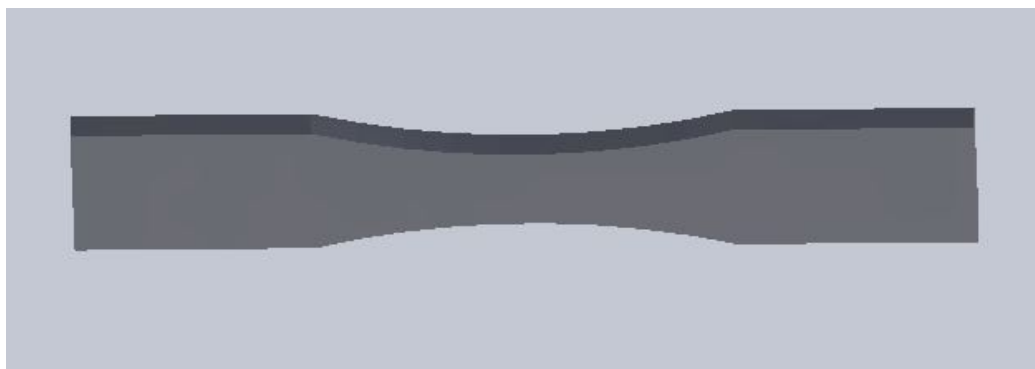


Ilustración 28: Diseño 3D de la probeta

Las medidas de la probeta pueden consultarse en el plano “Referencia: 00”

En segundo lugar, se genera un croquis en dos dimensiones con el dibujo en planta de la pieza. Utilizando “Cota inteligente” para determinar el tamaño y una vez sea el deseado, botón “extruir” para generar la pieza 3D del área seleccionada.

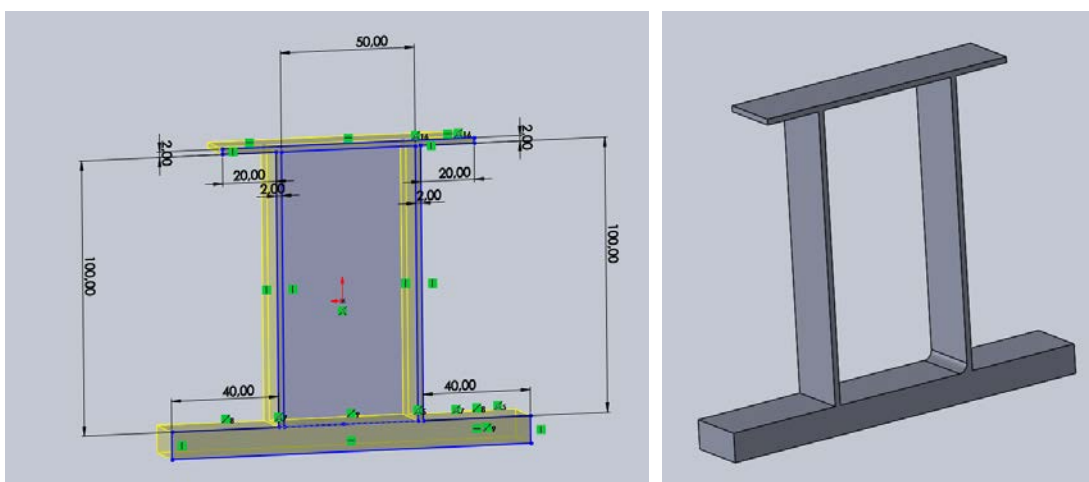


Ilustración 29: Comienzo de diseño del pórtico base

Se crean unos orificios en la viga del pórtico con el fin de tener un punto de referencia y que a su vez sirva para aplicar la carga, ya que para colgar una pesa es la mejor manera de conseguir un buen punto de apoyo.

Se generan en los apoyos unos redondeos que aportan un diseño más real y efectivo.

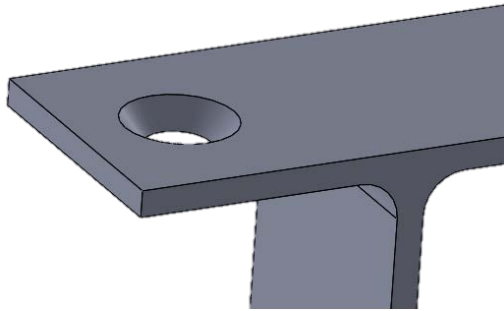


Ilustración 30: Taladros superiores

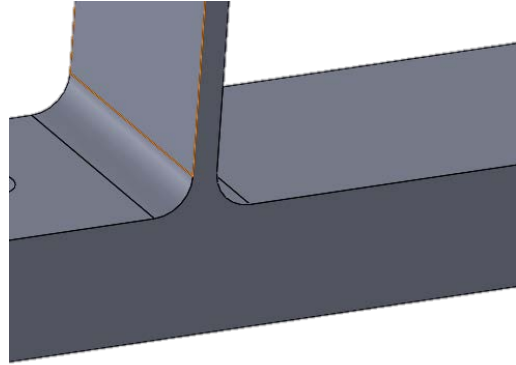


Ilustración 31: Suavizado de curva en los diseños

Los diseños base generados, del que se crearán los demás, queda de la siguiente manera.

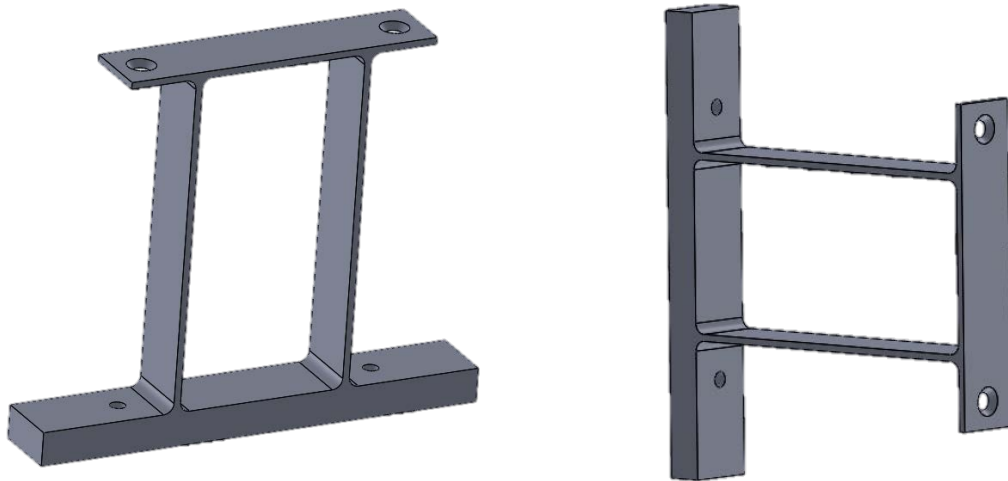
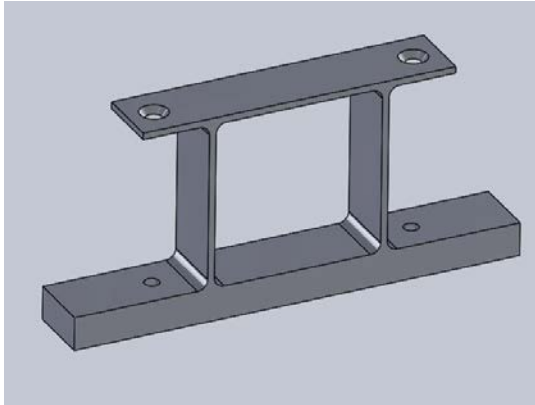
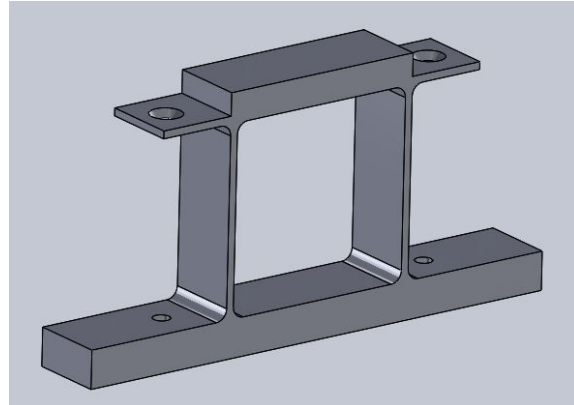


Ilustración 32: Vista 3D del pórtico base

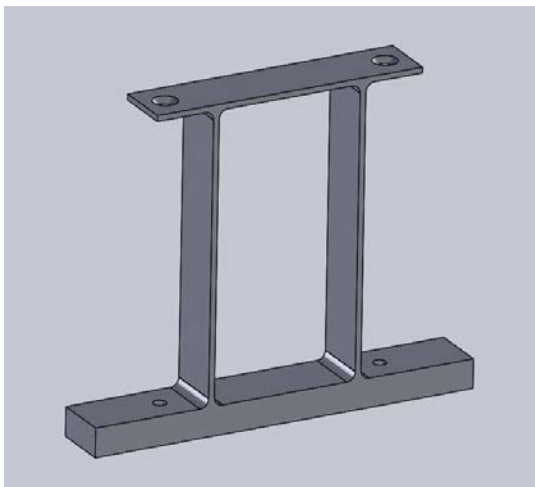
Se generan por tanto 6 diseños variando la cota L y H del actual diseño base, obteniéndose los diseños mostrados a continuación. Se añade en el pie de cada foto el nombre simplificado para los pórticos que será usado a partir de ahora para referenciar rápidamente el modelo. El nombre lo forma la medida L y H de la forma “XXXxYY”



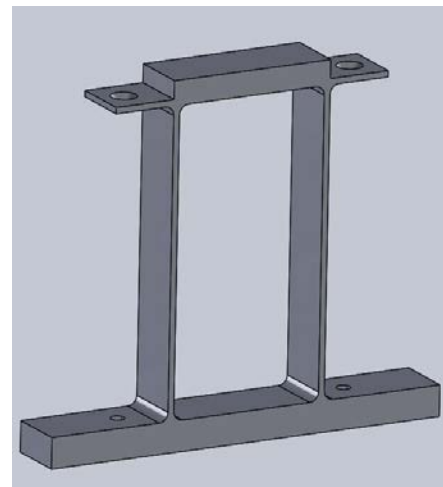
Plano Referecia "01"



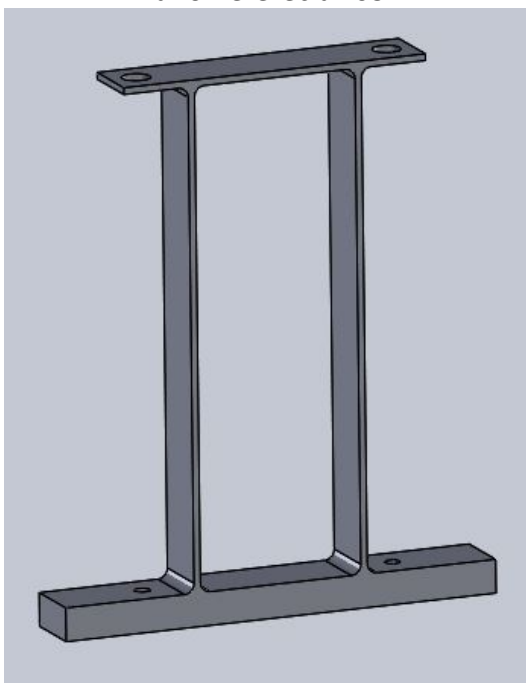
Plano Referecia "02"



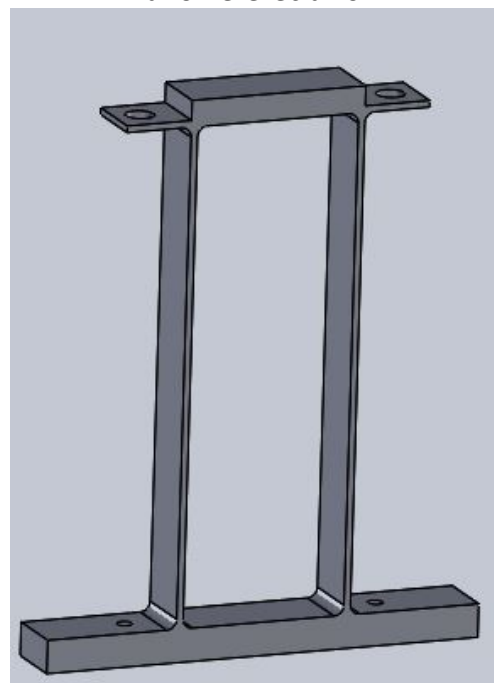
Plano Referecia "03"



Plano Referecia "04"



Plano Referecia "05"

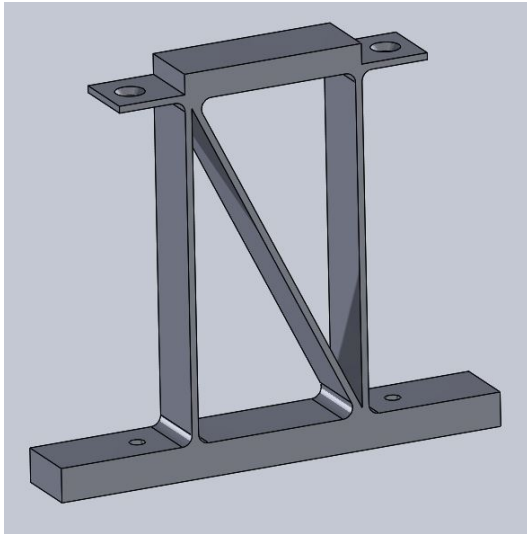


Plano Referecia "06"

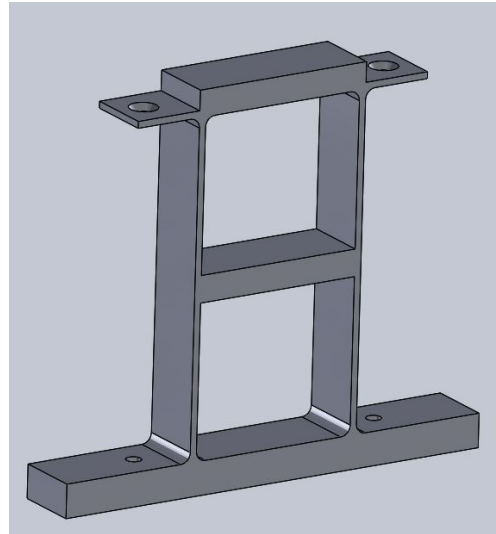
Ilustración 33: Conjuntos de primeros diseños de pórticos

Una vez ensayados estos diseños, se proponen dos nuevos, con elementos extra que buscan dar mayor rigidez y prestaciones a la hora de ser cargados con fuerzas.

Los dos nuevos diseños propuestos son los siguientes:



Plano Referencia "07"



Plano Referencia "08"

Ilustración 34: Pórticos modificados con elementos extra

9. Bases técnicas para la realización del proyecto.

Una vez obtenidos los diseños 3D, y antes de comenzar con las labores propias de la realización del proyecto práctico, se deben de asentar las bases técnicas de conocimiento que permitan llevarlo a cabo.

En primer lugar, se han de conocer las funciones básicas de la impresión 3D, con el software correspondiente y conocer los ajustes de impresión que suelen emplearse. Para ello se obtiene información de manuales y tutoriales online. De esta forma se ampliarán enormemente las posibilidades de variar los diseños únicamente modificando su estructura interna.

Una vez que la impresora está configurada correctamente, conectada a un PC, y se ha realizado ya la pertinente prueba inicial (En el caso de que sea la primera vez que se usa la impresora) se comprueba que todos los elementos funcionan correctamente.

Una vez se obtiene el archivo STL procedente de Solidworks, se trabaja desde el programa Slic3r para generar la configuración de la impresión. Este punto es muy importante ya que según como se impriman los pórticos, variaran las características mecánicas del mismo, por tanto, es muy importante saber de qué se trata la configuración de impresión, sus variables que nos proporciona y en definitiva la conversión desde el 3D virtual hasta la obtención del archivo G-code listo para ser impreso.

Las principales variables de impresión que constituyen la configuración a la hora de imprimir una pieza son las siguientes:

- Patrón de relleno
- Espesor de capa
- Densidad de relleno

Patrón de relleno: En la impresión 3D se generan piezas en volumen, pero no por ello estas piezas son completamente macizas, sino que se generan con patrones internos que aportan mayor o menor rigidez según el patrón seleccionado o si se incluyen capas sólidas dentro de la pieza.

Como es lógico, si un patrón es más o menos complejo en cuanto a su geometría, la impresión requerirá más o menos movimientos y por tanto más tiempo y material.

Las opciones de patrones que ofrece Slic3er son los siguientes:

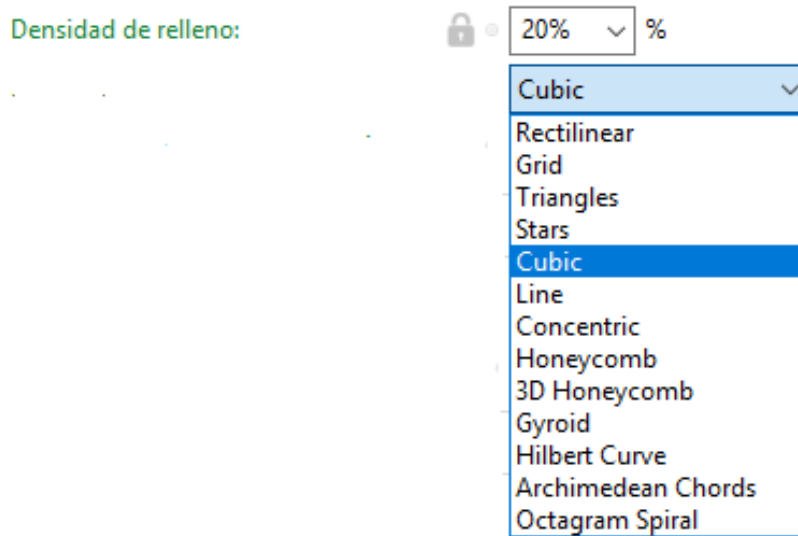


Ilustración 35: Patrones de rellenos disponibles en Slic3r

Cuando la densidad de relleno se especifica en 100%, la aplicación como es lógico, solo deja elegir el patrón rectilíneo, puesto que es el único admisible cuando toda la pieza se rellena de material.

En el presente proyecto, la mayoría de piezas se generan con el 100% de relleno, con el fin de que las características mecánicas sean lo más similares a piezas generadas por inyección.

Espesor de capa: Se refiere al espesor del material que la impresora va a ir depositando en la base para su construcción ya que tiene la posibilidad de generar las líneas con diversos tamaños. Esto influye en su rigidez (a más grosor más rigidez) y también influye de forma crítica en el tiempo de impresión, como se puede ver en el siguiente gráfico:

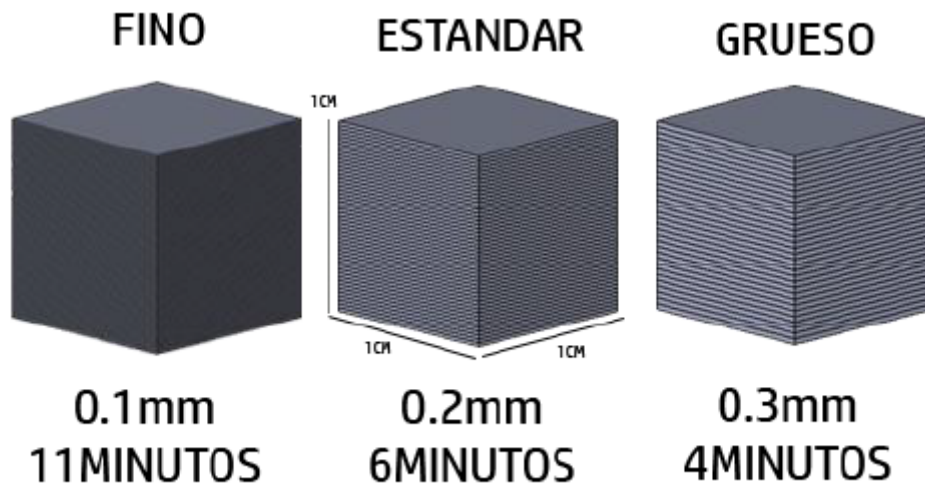


Ilustración 36: Comparación de espesor de capa

Densidad de relleno: Como se ha comentado, las piezas se rellenan de diferentes maneras, y el hecho de determinar qué porcentaje de relleno se requiere es fundamental en la pieza. Lógicamente cuanto más relleno más sólida será la pieza, y consecuentemente más material y tiempo será necesario emplear.

Podrá haber densidades de relleno de 10% a 100%.

El comportamiento mecánico de la pieza no es linealmente comparable con el porcentaje de relleno, por ejemplo, si se usa un patrón de panel de abeja, si se aumenta más del 20% ya no se mejora más el rendimiento, y por tanto solo supondrá un desperdicio de material.

Se muestran a continuación unas superficies con diferentes porcentajes de relleno:

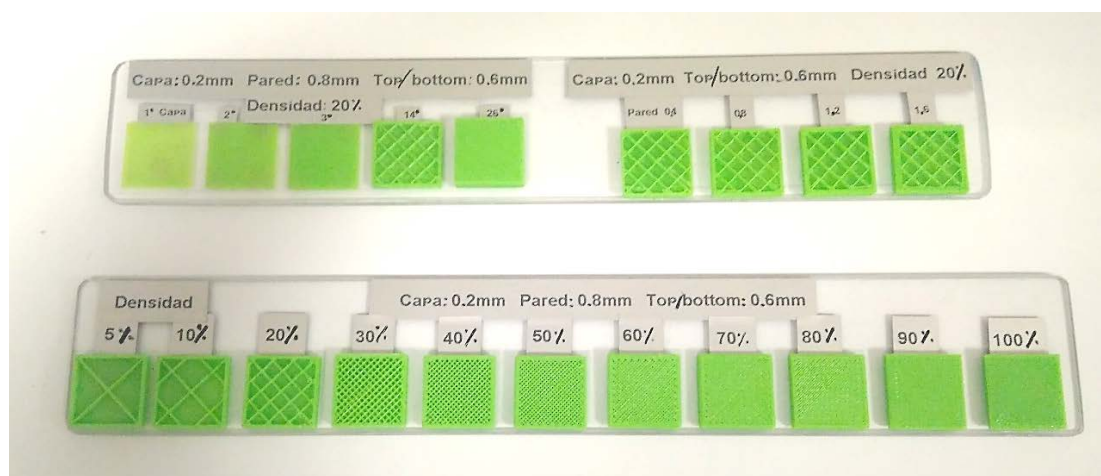


Ilustración 37: Porcentajes de relleno (probetas UR-Maker)

10. Ensayo de tracción en las probetas

En primer lugar, se han de conocer de la forma más precisa posible las características de los materiales a utilizar en la fabricación de los posteriores modelos 3D, para ello, se generan tres probetas del mismo material, y se ensaya en la máquina de tracción universal (Figura maquina)

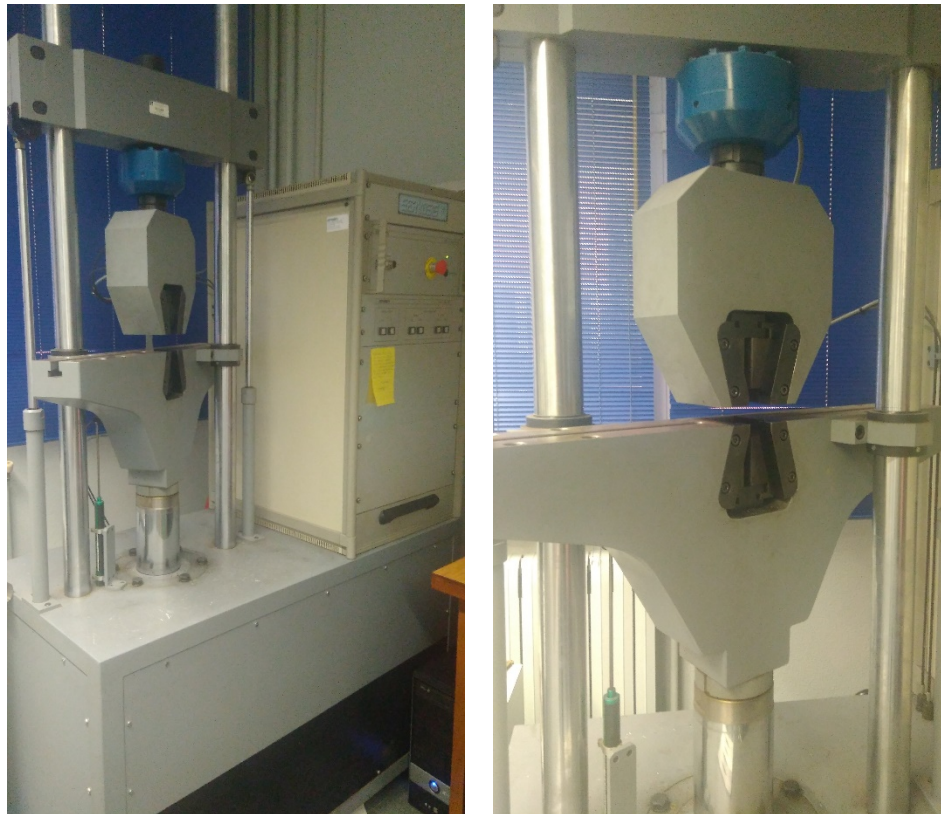


Ilustración 38: Máquina universal de tracción UR

En este caso se ensayan probetas de ABS y de PLA, es importante recalcar que se han impreso de forma horizontal, es decir, con la cara de mayor superficie apoyada sobre la cama caliente de la impresora. Imprimir las probetas de una u otra forma, cambia el resultado de sus prestaciones puesto que el proceso de impresión cambia totalmente y no se generan las fibras en la misma dirección en todos los casos.

El relleno utilizado en todas las probetas es del 100%, con un patrón rectilíneo. Con esta configuración se trata de asemejar al máximo el material al de piezas fabricadas por inyección o métodos industriales similares.

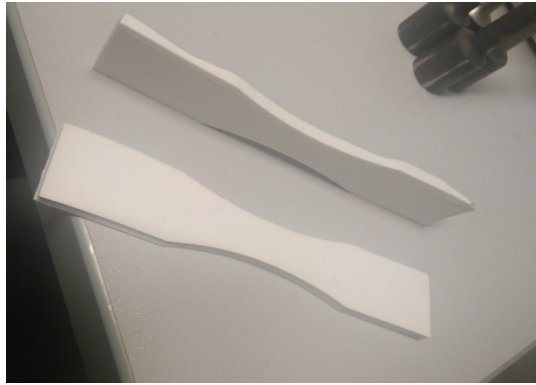


Ilustración 39: Probetas en ABS

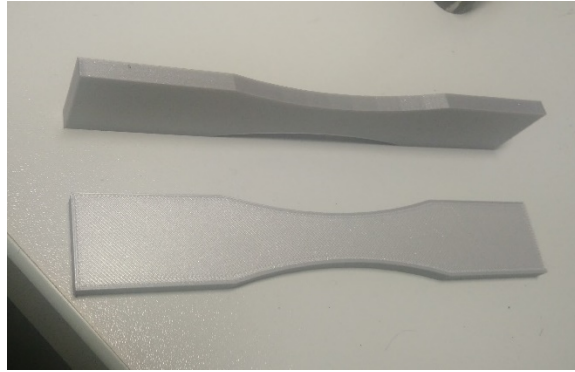


Ilustración 40: Probetas en PLA

Las probetas tienen un tamaño de 150 x 30 (mm) tal y como se refleja en el plano “00”.

Con el software SERVOSIS se recogen los datos de la máquina universal, es decir, la fuerza ejercida y el desplazamiento sufrido por la pieza hasta su rotura.

En la siguiente foto se muestra el resultado de uno de los ensayos de las probetas.



Ilustración 41: Pantalla del Software de máquina universal

El ensayo termina con la rotura de las probetas, debido a la fuerza ejercida a tracción, quedando las muestras divididas en dos, seccionadas como se puede observar en la siguiente foto, con un ejemplo de cada material:

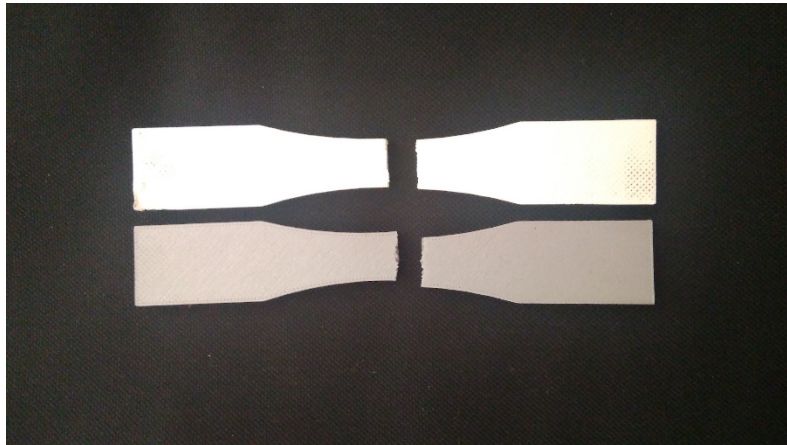


Ilustración 42: Probetas tras el ensayo de tracción

10.1 Procedimiento para ensayar las probetas

Una vez impresas las probetas, se instalan en las mordazas de la máquina de tracción universal, y comienza el ensayo con las siguientes características.

- Velocidad
- Unidades
- Exportación de datos

Cuando rompe la probeta, se para la máquina y se retiran de las mordazas. Los datos que se han obtenido en el ordenador se exportan en formato .txt para después trasladarlos a una hoja Excel y operar debidamente.

10.2 Obtención de los datos necesarios

Hay que tener en cuenta que las unidades de los datos son de Fuerza en el eje Y en este caso en toneladas, y de Desplazamiento en mm en el eje X.

Para poder operar se han de transformar estos datos a unidades correspondientes a Tensión en el eje Y en [MPa], y de Deformación en el eje X cuyo valor será un dato adimensional.

La finalidad es obtener las siguientes características:

- Módulo de Tensión [GPa]
- Tensión de Rotura [MPa]
- Alargamiento [%]

Para ello se procesan los datos de la siguiente manera.

Se obtienen en formato .txt desde el software de la máquina universal.

Stress-Strain Curves

Back File

	Force (N)	Deformation (mm)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
5	1244	0,558		
6	1430	0,698		
7	1881	0,95		
8	2048	1,068		
9	2224	1,148		
10	2528	1,329		
11	2783	1,461		
12	3283	1,9		
13	3626	2,423		
14	3743	2,716		
15				
16				
17				

Force Units: N Length Units: mm Stress Units: MPa Strain Units: mm/mm

Specimen

Gage Length: 90

Area: 77,91

Area Units: mm²

Plotting

Number of Points: 17

Plot

Set proportional limit at point: 11

☒ 0.2% Offset Method

☐ 0.05% Offset Method

Ilustración 45: Interface del programa MD Solid para los ensayos de tracción

Se introducen los datos progresivamente. Es importante seleccionar el punto que la máquina determina como punto de límite elástico en el recuadro de “Set proportional limit point”.

En “Gage Length” se introduce el valor que se ha estimado que la probeta se expone a la tracción en el ensayo, obviando los extremos que quedan dentro de las mordazas.

Cuando haya un número de datos considerable, se pulsa en el botón PLOT y se obtienen los siguientes resultados:

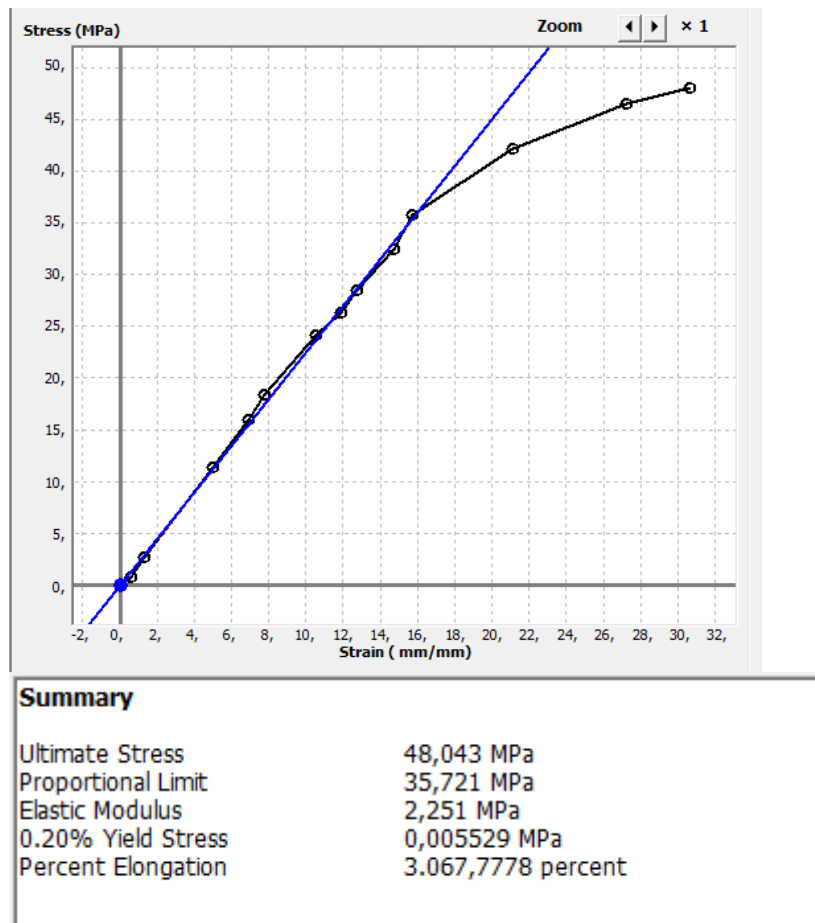


Tabla 3: Resultados tracción probeta 1 PLA

Una vez que se hallan los resultados, se comparan con los datos de la ficha técnica del fabricante para comprobar que los datos son coherentes y que los ensayos han reflejado con más o menos precisión la realidad.

De esta forma queda completado el caso práctico típico de ensayo de tracción, con el que obtener las características de materiales específicos. Es importante tener esta herramienta sobre todo en casos de investigación con impresión 3D, puesto que, aunque los materiales son conocidos, y sus características por tanto pueden ser aportadas por el fabricante, o por otras fuentes con bastante exactitud, la investigación con impresión 3D puede abarcar materiales que aunque sean homogéneos en elemento de aportación, varíe por otras razones, como la variación en el relleno, el patrón utilizado en su impresión o la forma en la que se imprime, referido al sentido de las fibras.

En este caso, el fabricante solo aporta datos de PLA. Se muestran a continuación:

MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS⁽³⁾:

Property / print direction	Horizontal	Vertical X,Y-Axis	Vertical Z-Axis	Method
Tensile Modulus [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Tensile Yield Strength [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Impact Strength Charpy⁽⁴⁾ [kJ/m²]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

⁽³⁾ Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to print testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PLA Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top: 0 Bottom: 0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 200mm/s; extruder temperature 215°C all layers; bed temperature 60°C all layers; other parameters set to default | ⁽⁴⁾ Charpy Unnotched, edgewise direction of blow according to ISO 179-1

DISCLAIMER

The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injuries or any loss caused by using of Prusa Polymers material.

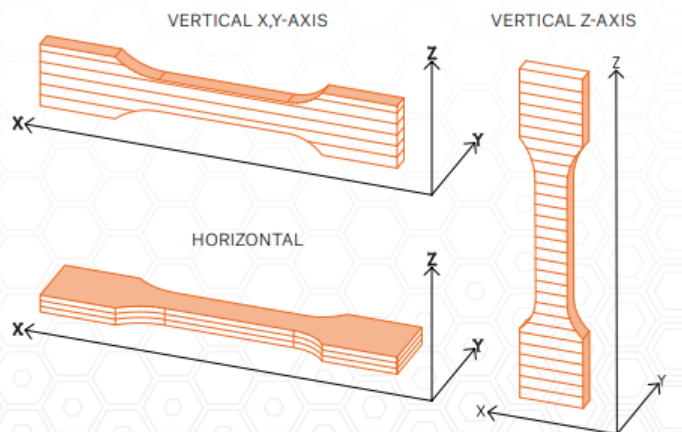


Ilustración 46: Propiedades mecánicas del PLA según fabricante (PRUSA)

DATOS	Ensayados	Ficha técnica
Módulo de Tensión [GPa]	2,251	2,2
Tensión de Rotura [MPa]	48,043	50,8
Alargamiento [%]	3,067	2,9

Tabla 4: Comparación de características PLA

Los datos coinciden con una precisión notable por lo que se estima que el ensayo ha sido realizado con éxito acorde a lo esperado.

Se genera otra probeta para consolidar los resultados del ensayo, a continuación se muestra su gráfica y sus resultados:

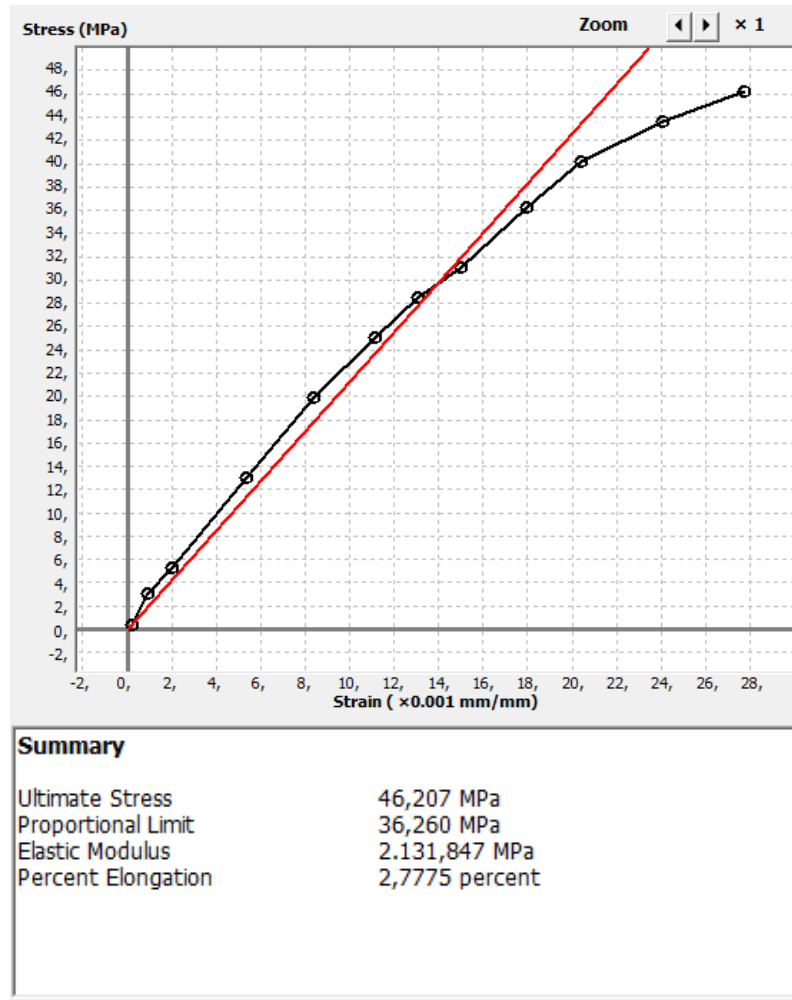


Tabla 5: Resultados ensayo probeta 2 PLA

Los resultados vuelven a ser acordes a los anteriores.

PLA		
DATOS	Media Ensayados	Ficha técnica
Módulo de Tensión [GPa]	2.131	2,2
Tensión de Rotura [MPa]	46.207	50,8
Alargamiento [%]	2.7775	2,9

Tabla 6: Comparación final del ensayo de tracción en PLA

Se ha comprobado la utilidad de la herramienta MD Solid para este tipo de ensayos, pero se encuentra algún problema a la hora de exportar con éxito los datos desde un formato .txt o Excel, por lo que hay que introducir datos a mano. A más datos introducidos, mayor exactitud del ensayo.

También hay que indicar en el programa el punto límite de elasticidad de la muestra. Dicho punto viene al final del informe .txt expresado en toneladas.

El ensayo del material PLA se da por concluido de forma satisfactoria.

Para el ABS no se obtiene información del fabricante, por ello se van a generar 3 probetas, y se realizará una media de resultados entre las tres para determinar las características del material.

Las gráficas, así como los resultados de las 3 probetas se muestran a continuación:

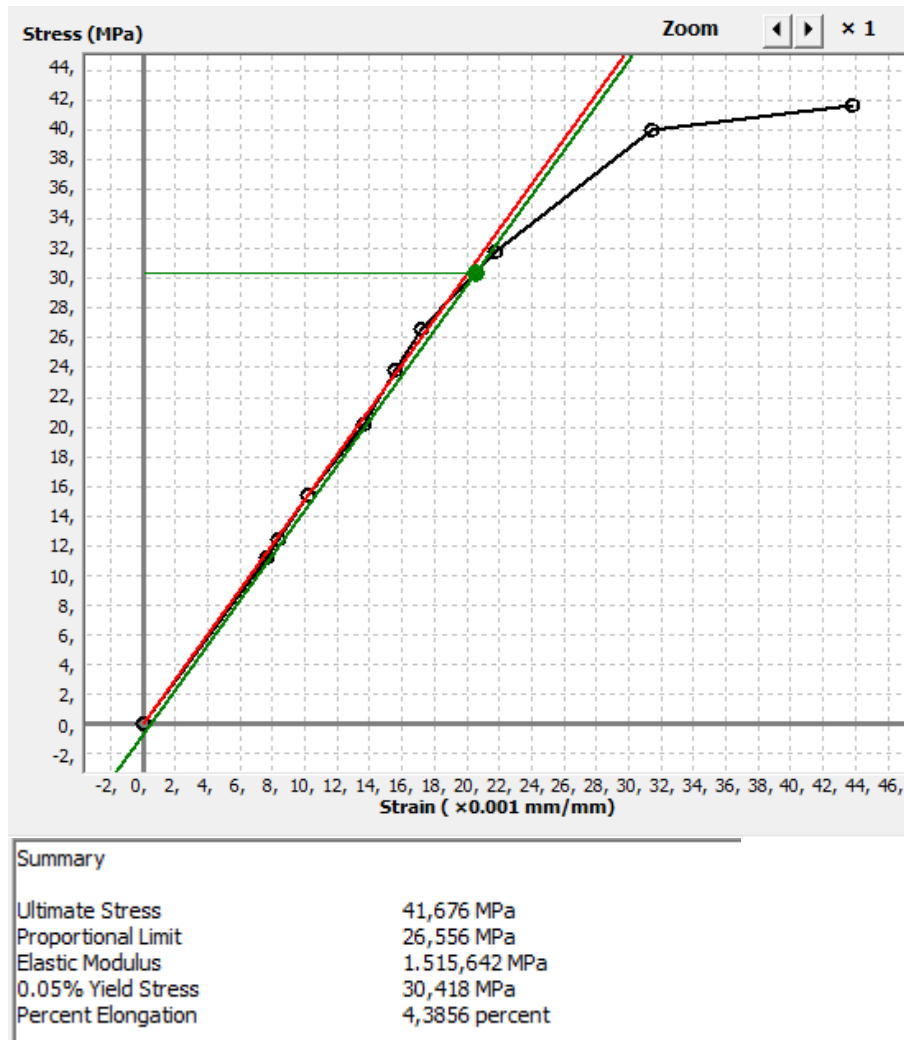
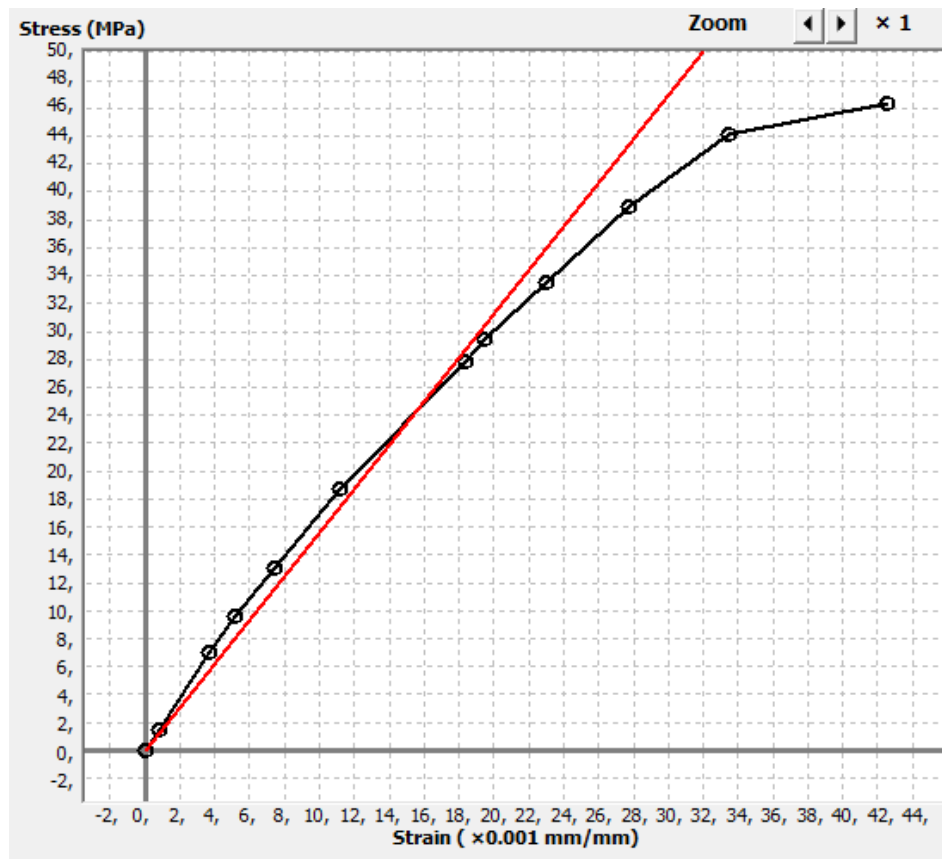


Tabla 7: Resultados ensayo probeta 1 ABS



Summary

Ultimate Stress	46,336 MPa
Proportional Limit	29,457 MPa
Elastic Modulus	1.565,572 MPa
Percent Elongation	4,2588 percent

Tabla 8: Resultados ensayo probeta 2 ABS

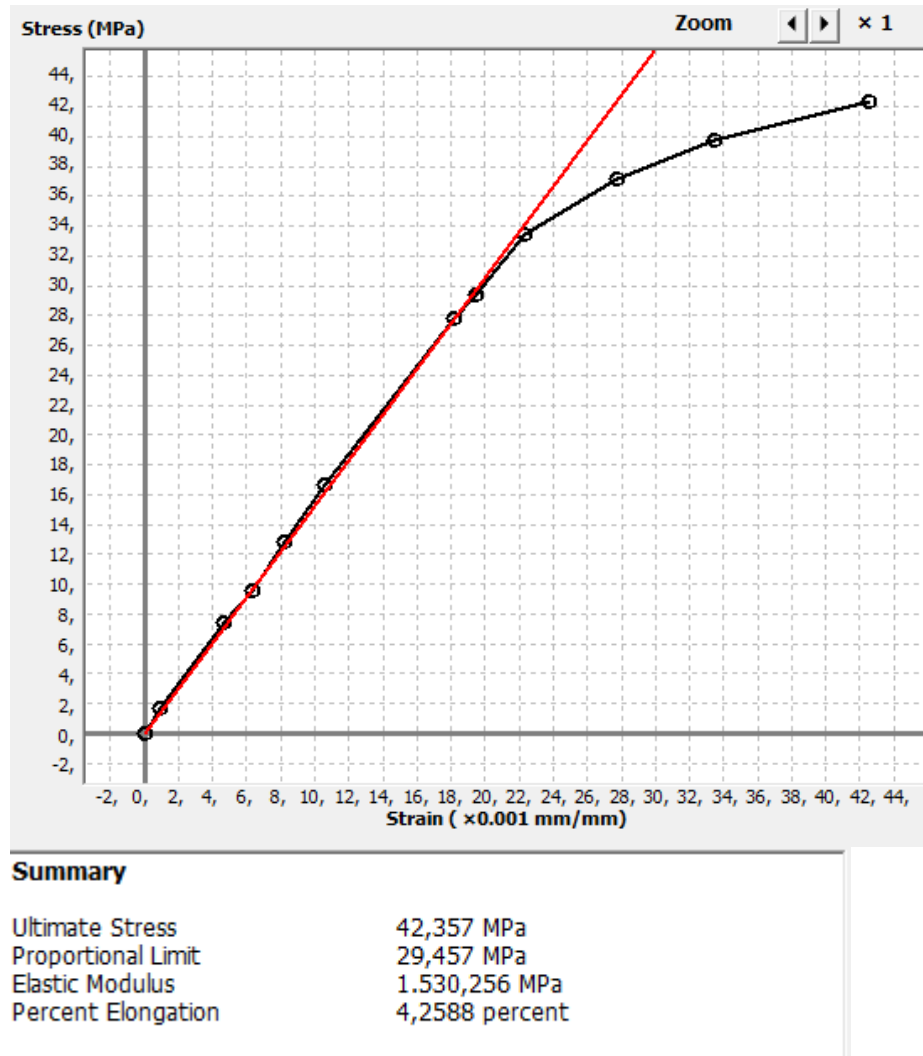


Tabla 9: Resultados ensayo probeta 3 ABS

Se realiza la media aritmética de los datos obtenidos en los tres ensayos, que formarán los valores finales del material ABS.

ABS				
DATOS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	MEDIA
Tensión Última [MPa]	41,667	46,336	42,357	43,453
Módulo de elasticidad [GPa]	1,515	1,565	1,53	1,537
Alargamiento [%]	4,38	4,25	4,25	4,29

Tabla 10: Comparación de resultados del ensayo de tracción en ABS

11. Ensayos de los pórticos 3D

11.1 Introducción al ensayo de los Pórticos

Se comienzan los ensayos con las siguientes 12 estructuras (6 diseños diferentes en dos materiales), que han sido diseñadas con el fin de observar cambios en el comportamiento (deformaciones) de cada pórtico en sí mismo, y en comparación con el resto. De esta forma se podrán definir unas conclusiones basadas en los cambios de diseño, que reflejarán una idea final de cómo cada modificación implantada en los diseños 3D puede generar en mayor o menor medida cambios en el comportamiento mecánico de la estructura, al aplicarse en ellas una fuerza de igual valor.

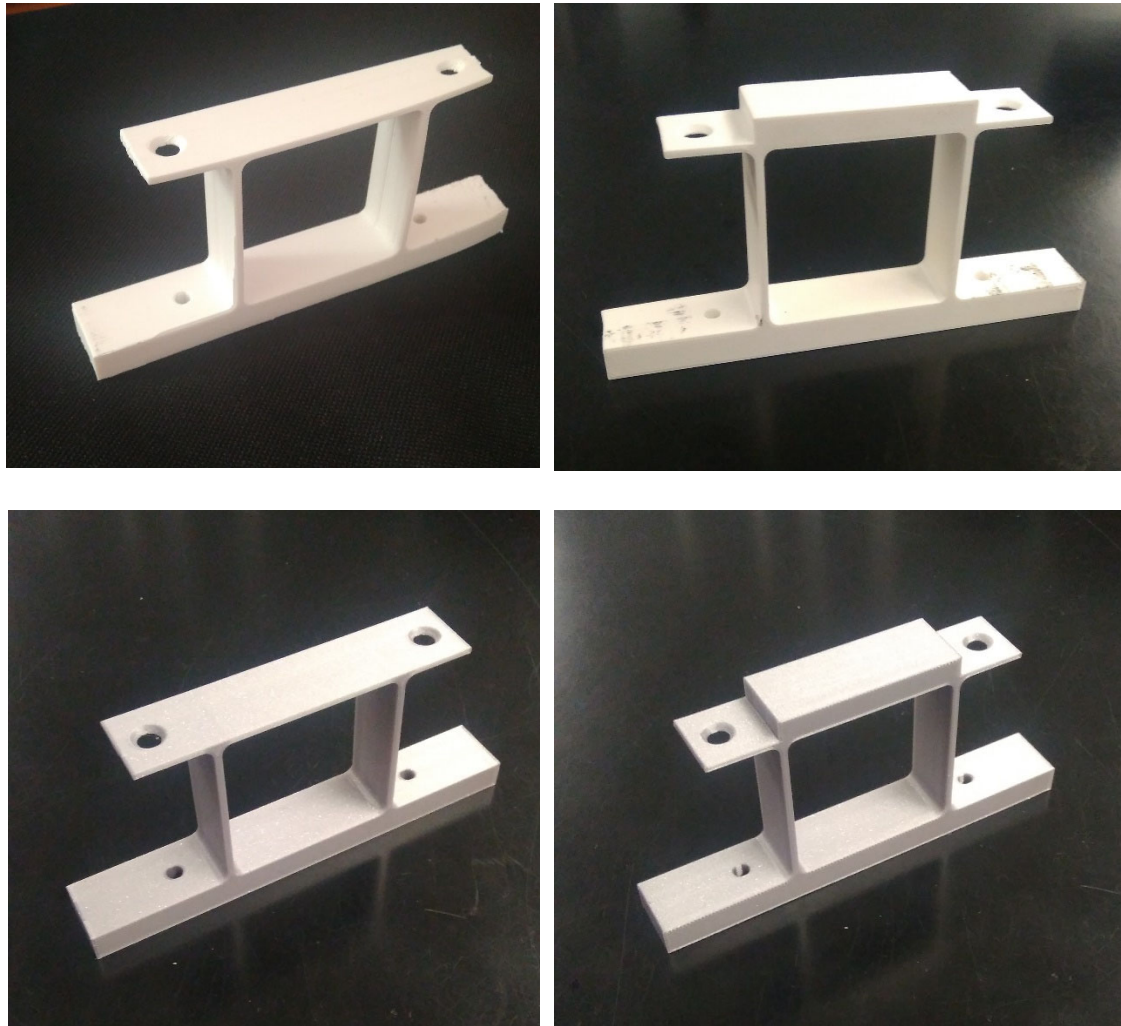


Ilustración 47: Pórticos de L=50mm impresos en ABS y PLA

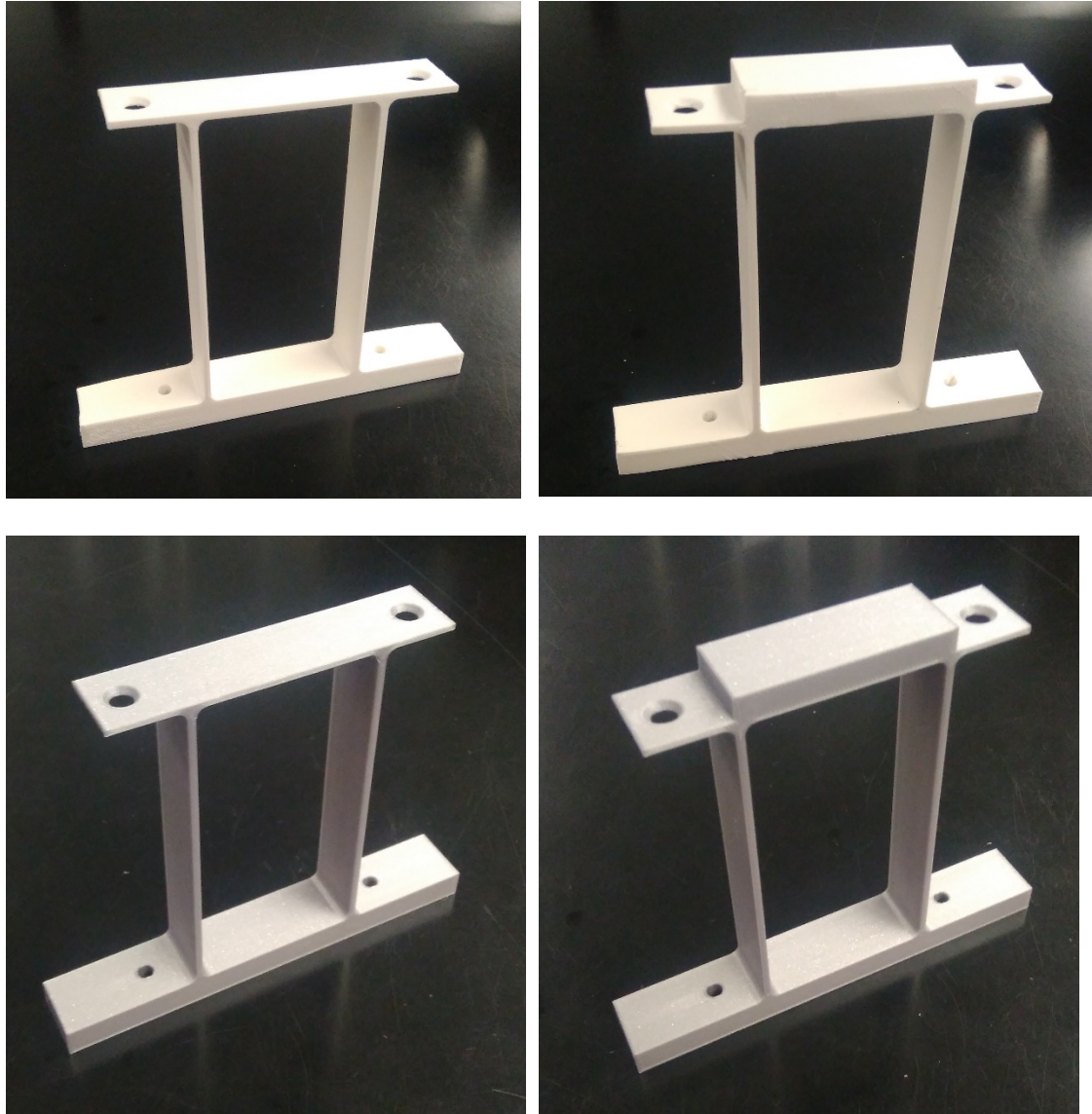


Ilustración 48: Pórticos de L=100mm impresos en ABS y PLA

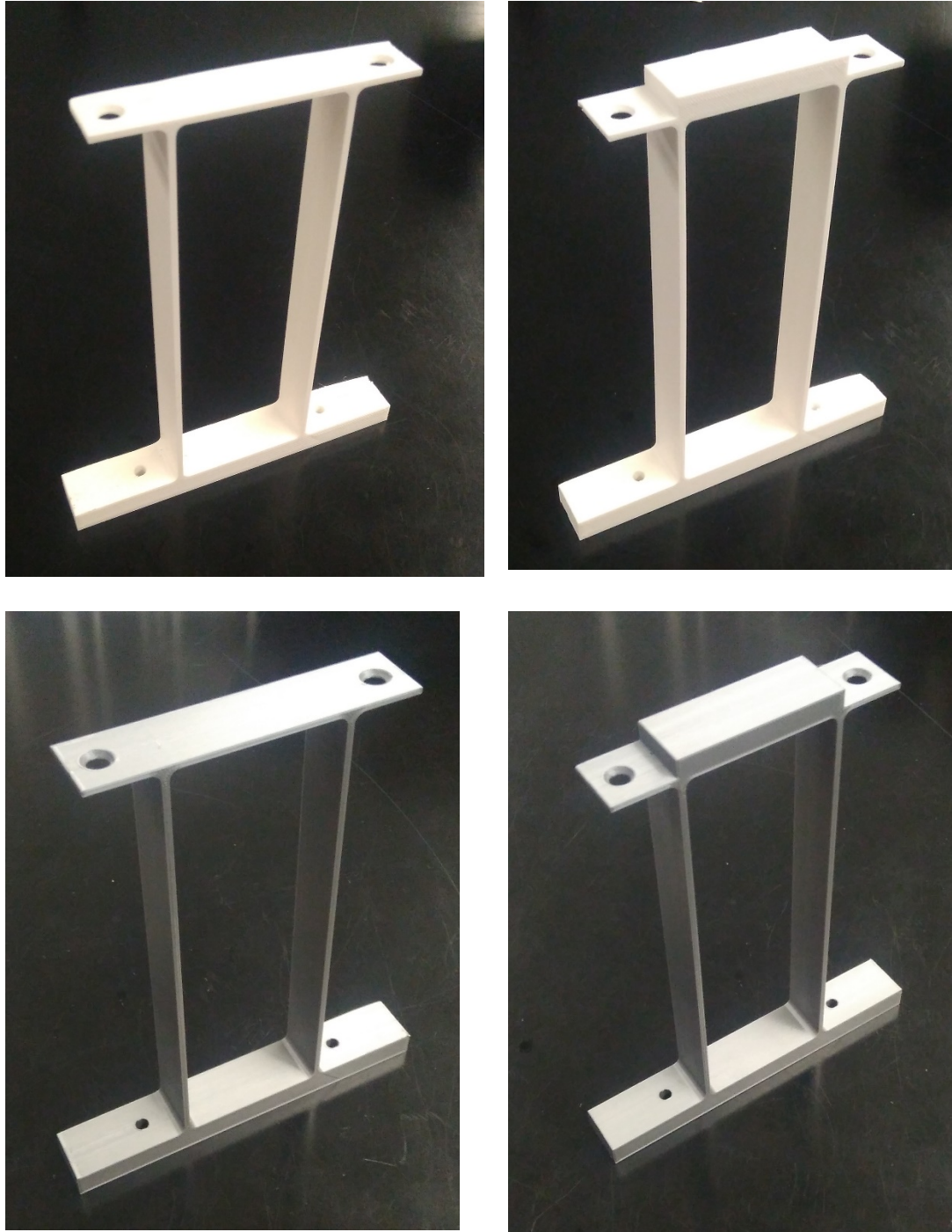


Ilustración 49: Pórticos de L=150mm impresos en ABS y PLA

Los ensayos serán los mismos para todos los pórticos.

Se debe focalizar la atención en la flexión relativa del pórtico en la dirección de la carga aplicada, la cual va a ser medida con el calibre de reloj y apuntado el valor. Los diseños a ensayar han sido generados con una geometría que facilita su impresión 3D, en todos los casos. Los experimentos han de ser lo más sencillos posibles.

De esta forma se puede comparar la teoría (esencialmente el método lineal de rigidez usando elementos elásticos) y experimentando con las diferentes variantes que nos

ofrece tanto la impresión 3D (diversas formas de imprimir) como el diseño 3D (diferentes diseños) como por supuesto la variación de las cargas.

Los detalles específicos de cada diseño y ensayo se darán posteriormente, pero como introducción a este punto, considerando la figura número XX (foto)XXXXXXX Si se ancla la parte inferior del pórtico y se aplica una fuerza lateral en la viga superior, se podrá obtener la rigidez de la estructura en base a su flexión lateral.

La rigidez de las columnas se escala con la expresión EI/L^3 y por tanto al disminuir la longitud de las columnas se espera una mayor rigidez de la estructura, por otra parte, si fuese un diseño con unas columnas mayores, producirá teóricamente un desplazamiento mayor.

Como se explicó anteriormente, para hacer la comparación entre los pórticos más sencilla, se define un pórtico de referencia del que después nacen el resto de diseños.

El pórtico de referencia y todos sus datos se muestra a continuación:

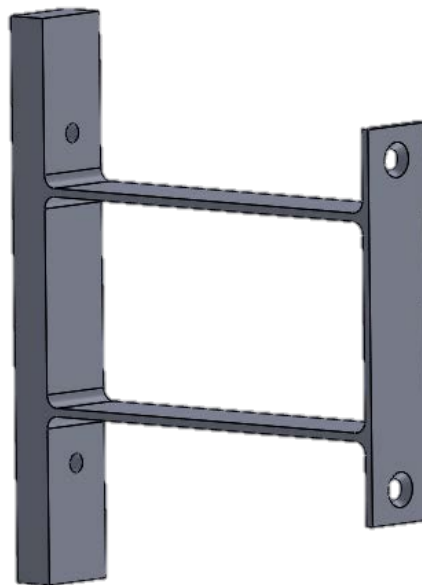


Ilustración 50: Pórtico de referencia en posición de ensayo

Características dimensionales:

L	100 mm
W	50 mm
H	2 mm
E	20 mm

11.2 Análisis dimensional.

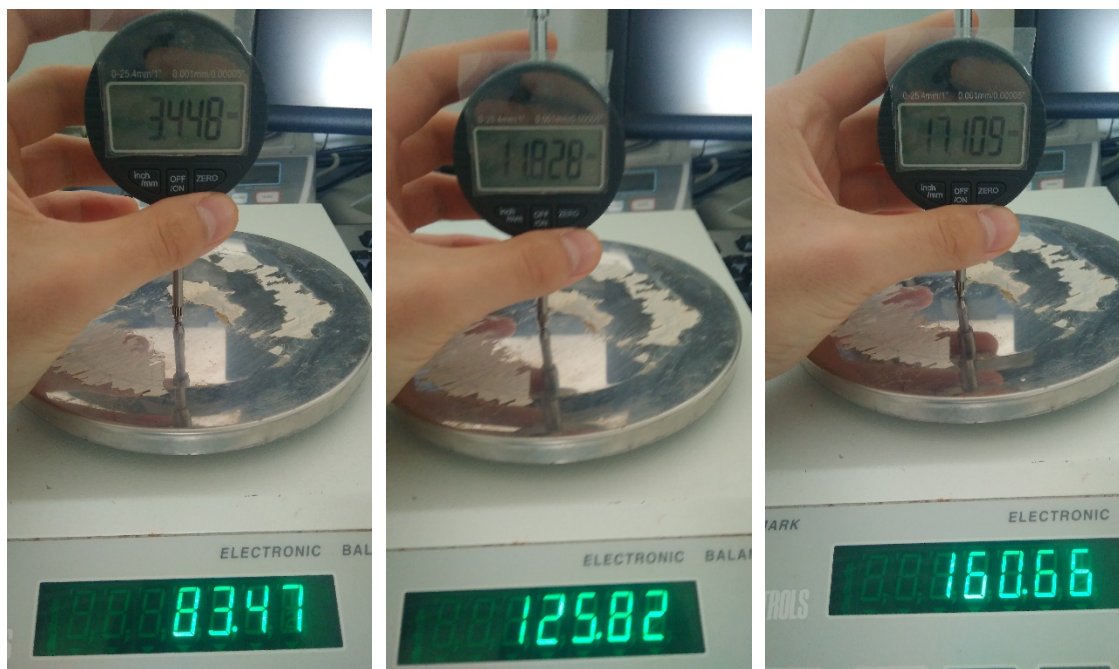
Antes de avanzar sobre el ensayo se toman las medidas reales del producto final con el propósito de verificar que las dimensiones impresas corresponden por las requeridas en el plano. Una vez verificados los resultados, se determina que el producto cumple los requisitos dimensionales y se avanza al segundo ensayo. En este caso todas las piezas cumplen con los requisitos dimensionales. Las pequeñas deformaciones que se encuentran en las piezas de ABS, se consideran que no afectan a zonas evaluables de las piezas.

11.3 Compensación de la fuerza del muelle del calibre

El calibre de reloj digital se apoya en el extremo de la pieza como se observa en la imagen, y esto implica que el muelle de la galga del calibre aplica una pequeña fuerza en la pieza, por lo que esta se deforma en mayor o menor medida según el modelo. Por ello se debe tarar el calibre en el punto de contacto, pero sin dejar caer la galga (sujetando desde arriba para mantener el muelle contraído) y después soltar y anotar el resultado del desplazamiento que esta fuerza del muelle genera.

Para saber de qué fuerza se trata, se mide su magnitud en una báscula de precisión, para obtener el valor. El resultado se refleja en la “Tabla 11”

Los resultados tomados en la báscula son los siguientes:



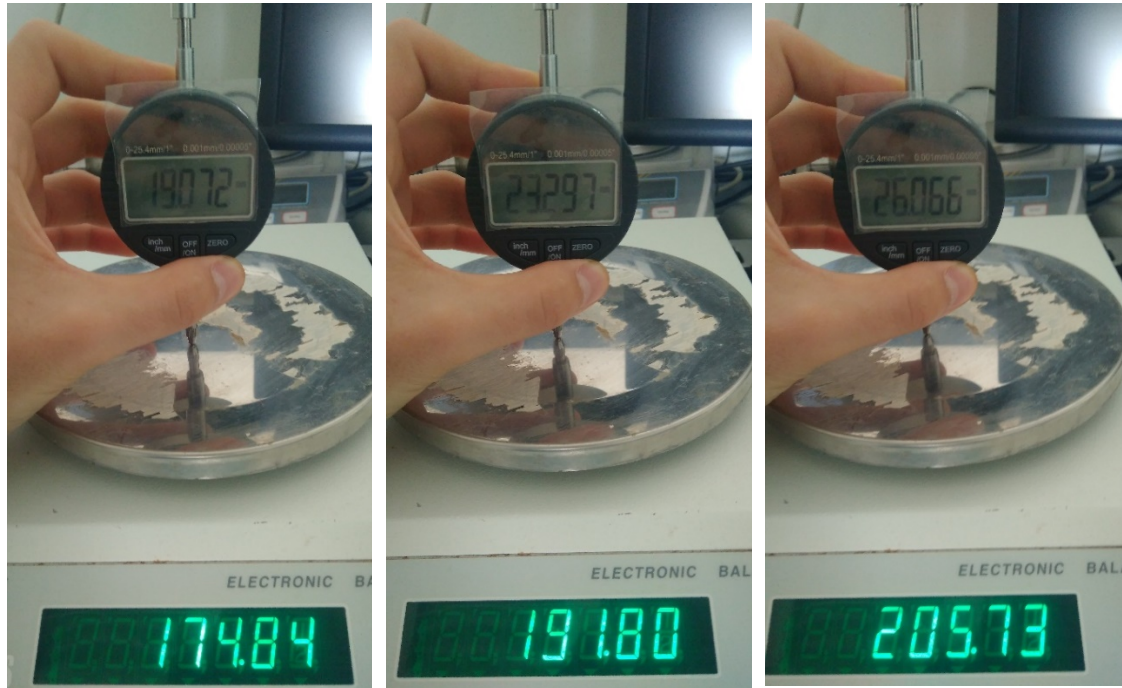


Ilustración 51: Toma de datos de la fuerza en [g] que ejerce el muelle del calibre a diferentes alturas.

Se trasladan estos datos a una hoja Excel donde se genera una ecuación correspondiente a la fuerza del muelle del calibre.

distancia [mm]	peso [g]	N
3,45	83,47	0,82
11,83	125,82	1,23
17,11	160,66	1,58
19,07	174,84	1,72
23,30	191,80	1,88
26,07	205,73	2,02

Tabla 11: Recopilación de datos de la fuerza del muelle

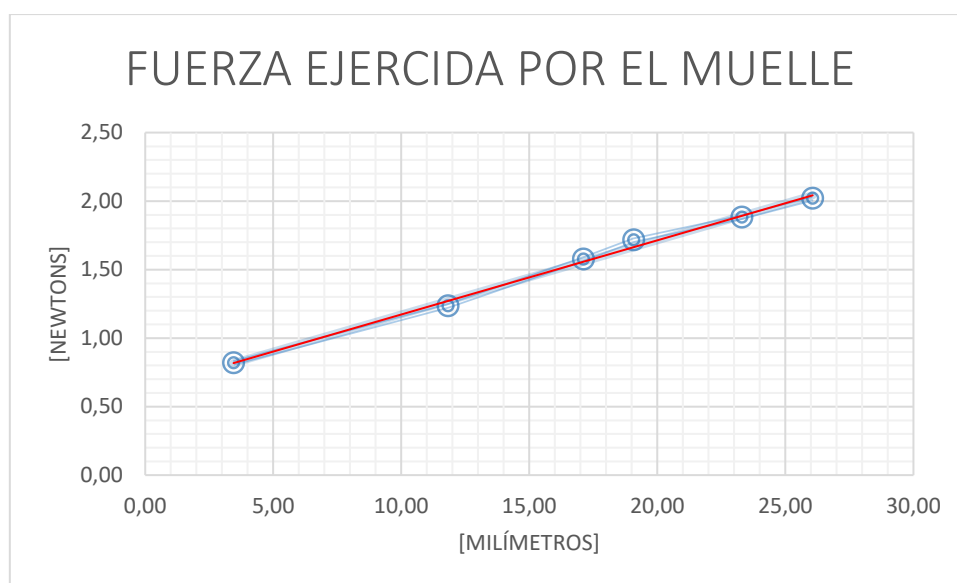


Tabla 12: Gráfico de la fuerza ejercida por el muelle

Por tanto se ha de tener en cuenta, que a parte de las cargas aplicadas con las pesas, también se está generando una fuerza en la misma dirección por parte del muelle del calibre. Como se observa en el gráfico, la fuerza es mayor cuanto más comprimido se encuentra el muelle, aplicando un valor en torno a 2N cuando está comprimido por completo.

Es por esto que se toma la medida del desplazamiento de los pórticos cuando ni tan siquiera se ha aplicado la fuerza (1N) del soporte de las pesas.

11.4 Aplicación de cargas

El primer ensayo será el referente de todos los demás, y se explica detenidamente atendiendo a todos los pasos a seguir, y mostrando todos los datos obtenidos.

Ya que los ensayos se realizan de igual manera en todos los pórticos, en los sucesivos realizados para las modificaciones del pórtico base, no se generará un informe tan extenso con explicaciones detalladas de los pasos seguidos, puesto que sería repetir los detallados en este primer ensayo.

Por tanto los diseños ensayados como referencia, son los que poseen los siguientes valores dimensionales:

L	100 mm
W	50 mm
H	2 mm
E	20 mm

Con ayuda de los aprietos, se empotra el pórtico a una superficie vertical. La estructura ha de ser metálica en este caso, ya que, para acoplar el calibre, el soporte necesita una zona en la que poder imantarse para fijar su posición.

Una vez instalado se acopla el calibre, completamente retraído, para aportar el mayor rango de recorrido posible a la estructura. Se tiene en cuenta que el calibre genera 2N de fuerza en esta posición, por lo que primero se pone en contacto cuidadosamente con la mano, evitando que el calibre ejerza presión sobre el pórtico. Esto se consigue sujetando la galga del calibre por arriba, contrarrestando la fuerza del muelle.

Cuando el calibre esté en contacto con la pieza sin ejercer presión, es el momento de tarar el calibre y ponerlo a cero. Acto seguido ya se puede liberar la galga del calibre, dejando así que este ejerza su fuerza sobre la estructura. Se observa por tanto un desplazamiento debido a esta carga, siendo esta la primera medida a anotar en el ensayo.

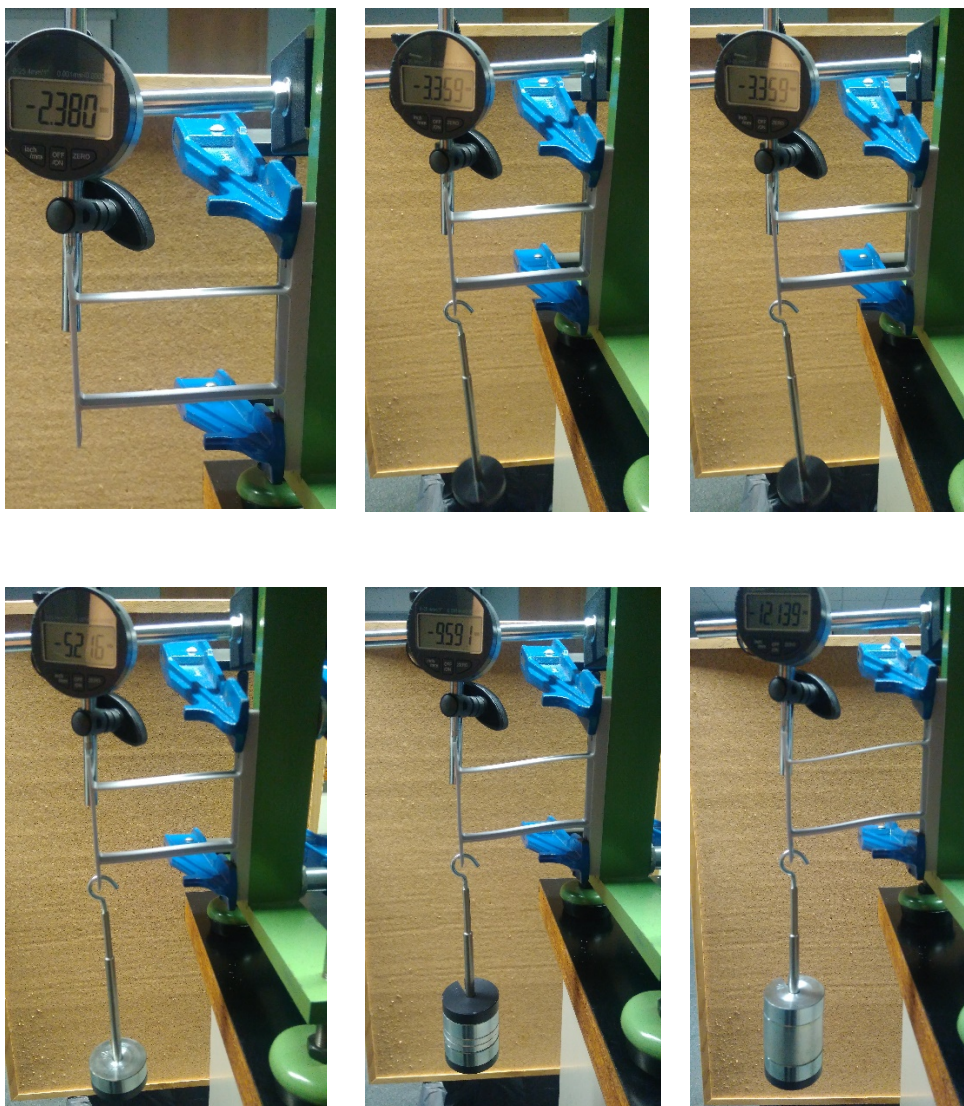


Ilustración 52: Ensayo del pórtico $L=100\text{mm}$ $H=2\text{mm}$ (PLA) en el laboratorio

PLA					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
2,38mm	3,359mm	5,216mm	7,186mm	9,591mm	12,14mm

Se realiza el mismo ensayo con el modelo impreso en ABS, siguiendo el mismo procedimiento que en su diseño homólogo de PLA.

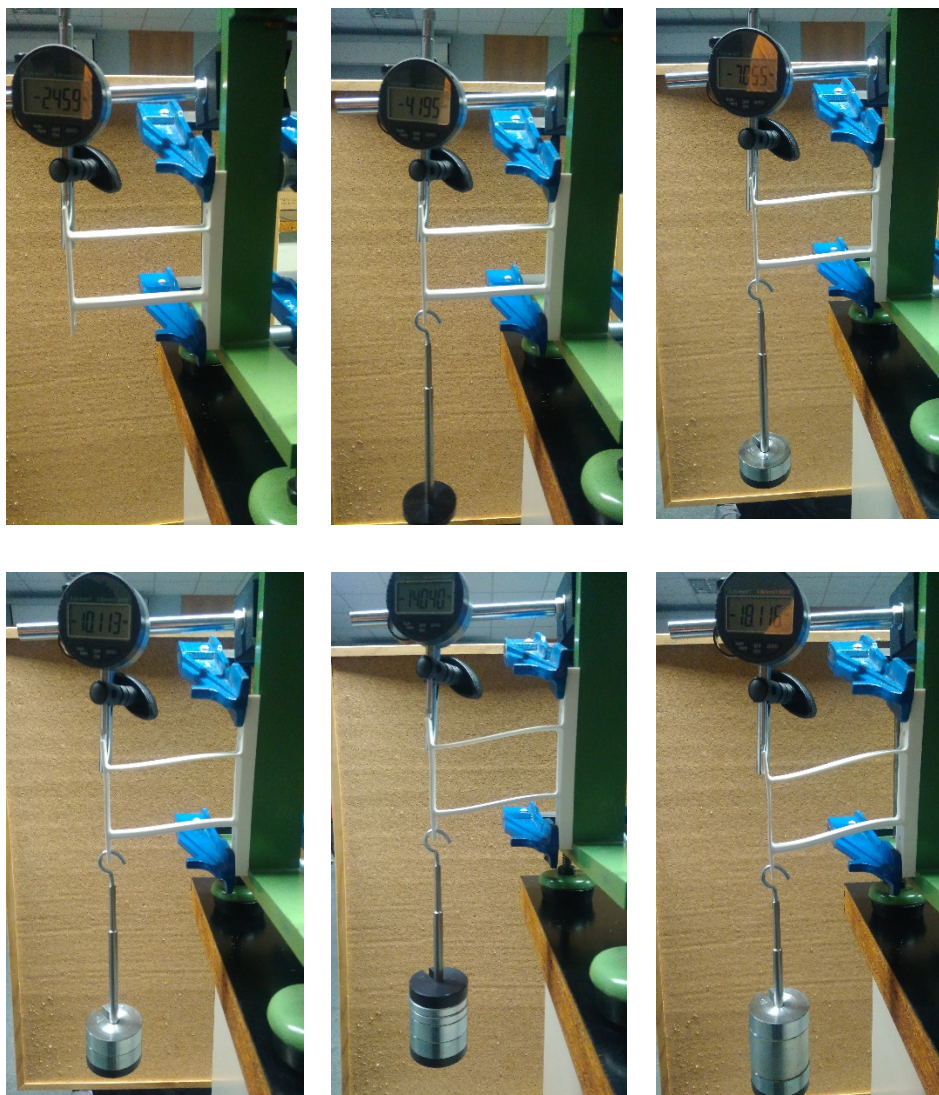


Ilustración 53: Ensayo del pórtico $L=100\text{mm}$ $H=2\text{mm}$ (ABS) en el laboratorio

ABS					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
2,459mm	4,195mm	7,065mm	10,113mm	14,042mm	18,116mm

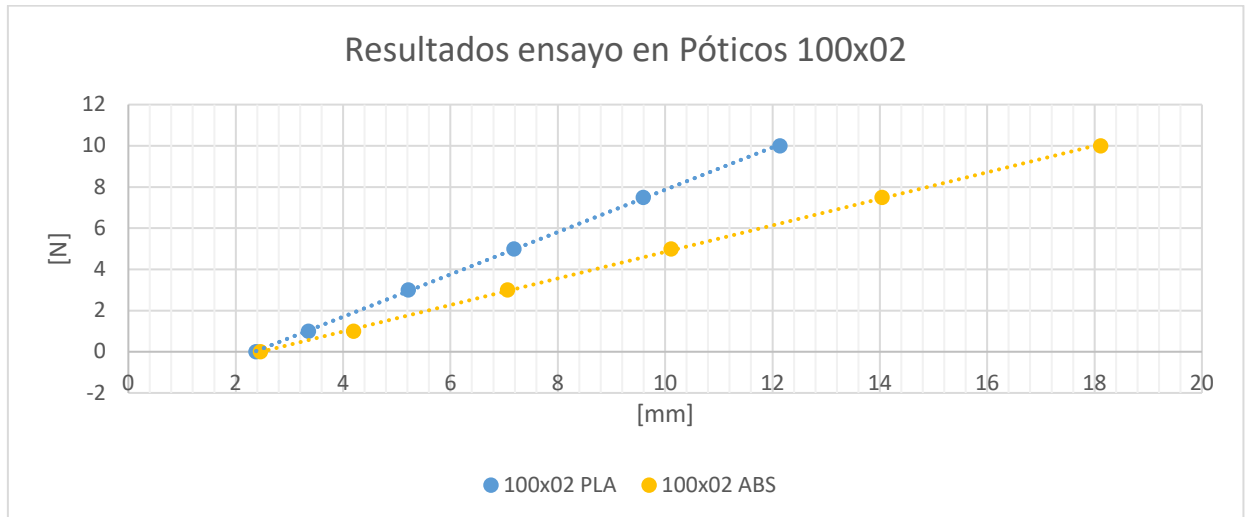


Tabla 13: Comparativa entre pórticos $L=100\text{mm}$ $H=02\text{mm}$

Los resultados prácticos se encuentran claramente en una zona de deformación elástica, con un consecuente comportamiento lineal. Esto también se ratifica al quitar las pesas que cargaban la estructura, y observando como la estructura vuelve a su posición inicial cuando cesan las tensiones.

En cuanto a la diferencia entre materiales, se observa un comportamiento más rígido por parte del PLA frente al ABS con una diferencia bastante considerable, que obviamente se va incrementado a medida que aumentan los esfuerzos aplicados.

11.5 Resolución en “SolidWorks” del pórtico base

A continuación se van a ensayar los pórticos de forma teórica, apoyando el estudio en el programa SolidWorks, que se convierte en este caso en un potente simulador de las piezas. Como las piezas ya están diseñadas, únicamente hay que determinar el material del que están compuestas, y las condiciones de apoyos y cargas.

Al tratarse del primer modelo ensayado, como ya se comentó anteriormente, se explicarán con detalle los procedimientos llevados a cabo para simular en el programa “SolidWorks” los pórticos impresos.

Para comenzar se abre el archivo de la pieza correspondiente.

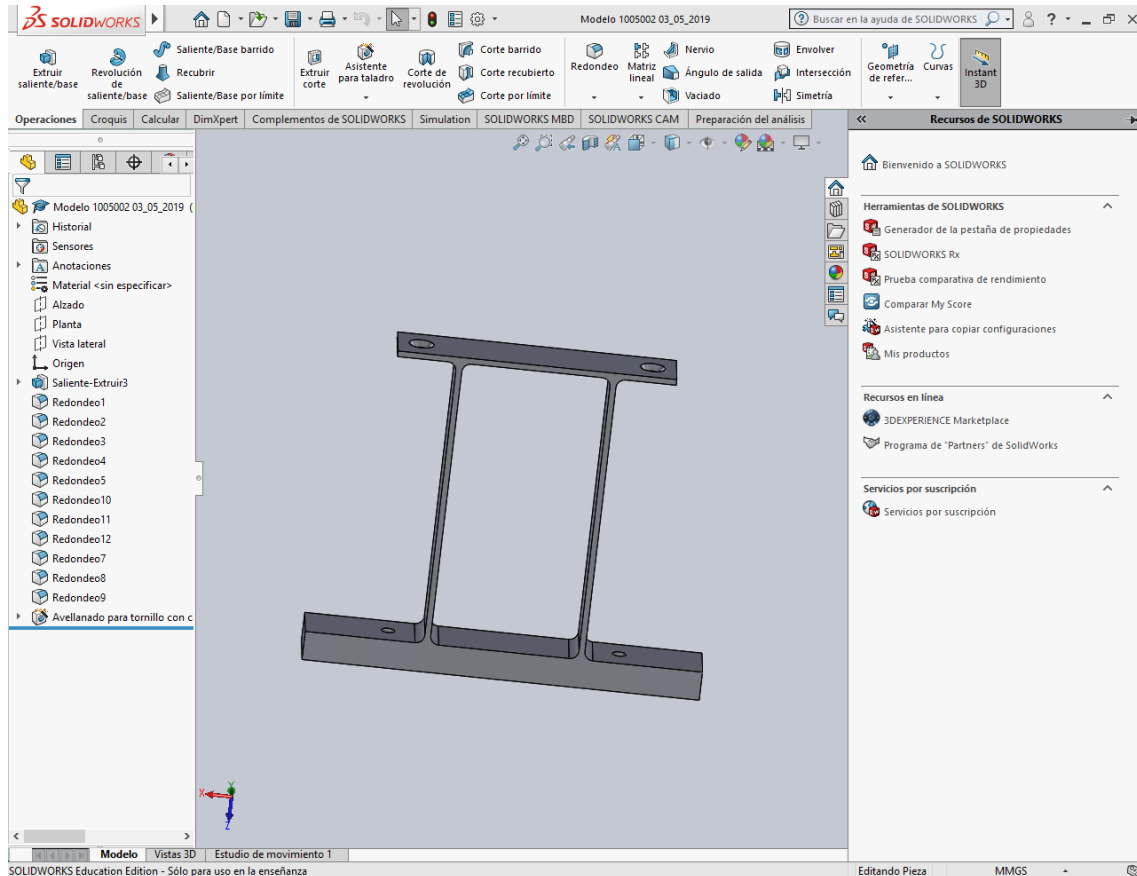


Ilustración 54: Diseño abierto en SolidWorks

Ahora se especifica el material de la pieza. De este modo, el programa aporta al diseño las características mecánicas propias del material con el que se han impreso los modelos.

Para ello se pincha en la pestaña “Material” (que ahora se encuentra sin especificar) y se selecciona el material deseado. En este caso ABS, que viene definido por defecto:

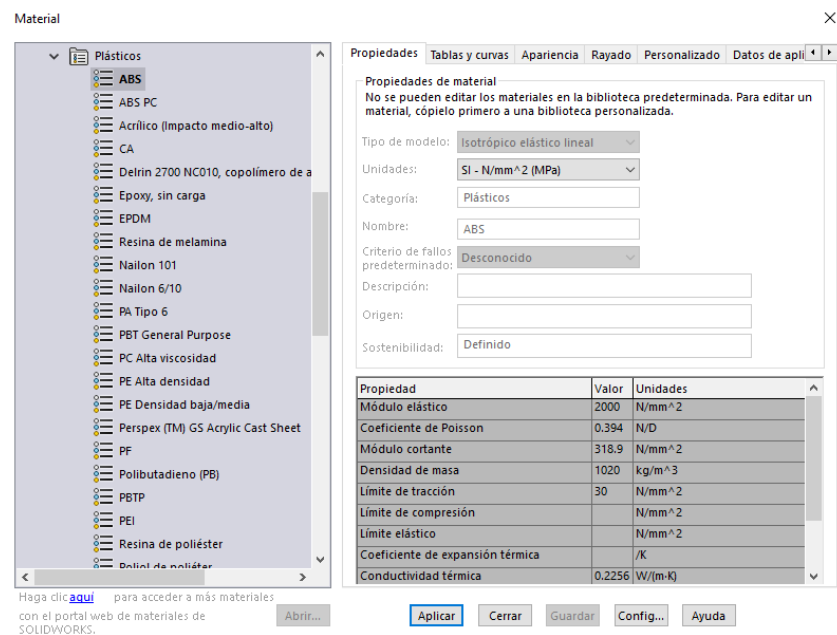


Ilustración 55: Especificación del material de la pieza

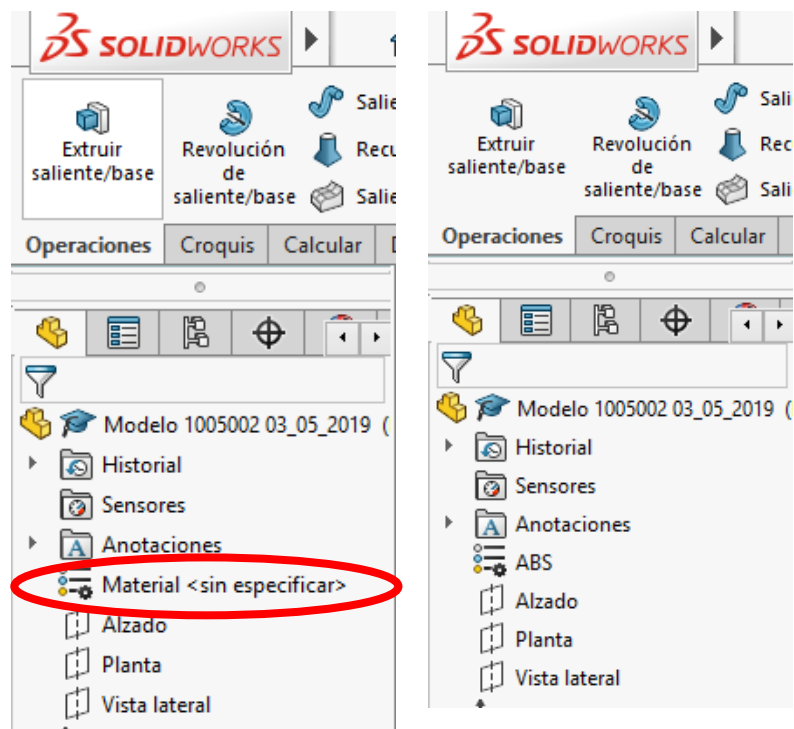


Ilustración 56: Cambio en el menú sobre el material

Como el material predefinido se asemeja al material estudiado, en los ensayos de tracción, se selecciona en primera instancia tal y como viene, y si los resultados no fuesen acordes a los ensayos reales, se modificaría en posteriores pruebas.

Como se observa, después de aplicar el material, ahora ya el programa, en el apartado de material, notifica que es ABS el material del que se forma la pieza.

Ahora es el momento de generar una situación idéntica a la de los ensayos en el laboratorio, para ello se abre la pestaña de “simulación” y se genera un Nuevo Estudio.

En concreto se selecciona el “Análisis Estático” y se acepta.

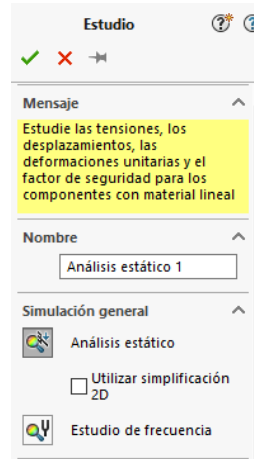


Ilustración 57: Selección de tipo de estudio

Cuando se acepta, en seguida se genera el menú principal propio del ensayo en el que se permite adaptar el ensayo al realizado en la realidad, y para ello se comienza con el apartado de sujeciones:

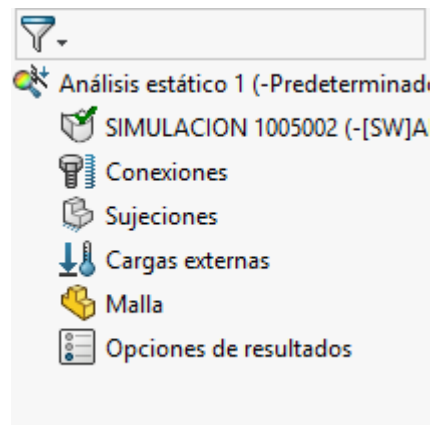


Ilustración 58: Opciones del estudio estático de la pieza

Se accede al apartado de malla, para determinar la forma en la que se va a gestionar la pieza actual a nivel de procesamiento de elementos finitos. Se acepta la configuración por defecto que ofrece SolidWorks. A continuación se muestran los valores y la configuración seguida en este caso y en el resto de ensayos.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	3.37542 mm
Tolerancia	0.168771 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	16185
Número total de elementos	8941
Cociente de aspecto máximo	8.0174
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	95.1
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:01
Nombre de computadora	DeptS1-21

Ilustración 59: Propiedades de la malla de renderizado

Haciendo click derecho en la pestaña, ahora se elige la cara que se desea empotrar, y se activa la opción de geometría fija, como se muestra en la siguiente imagen:

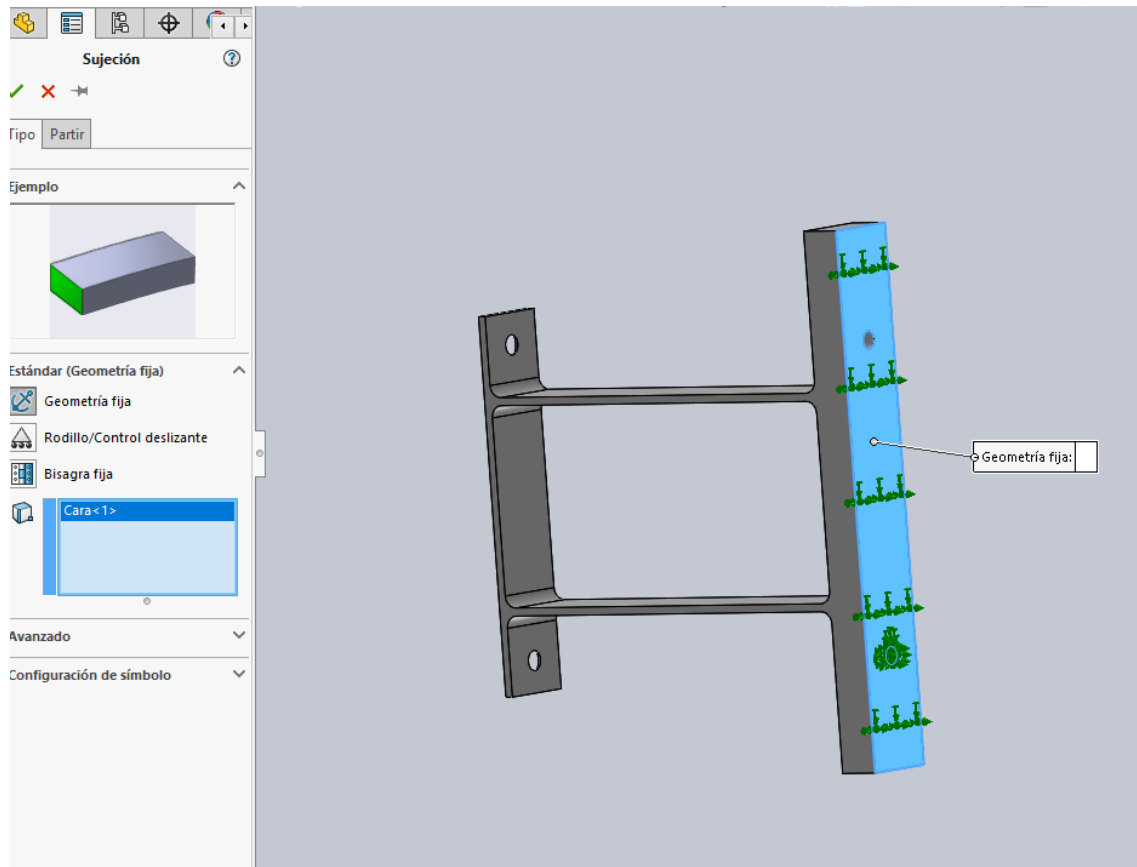


Ilustración 60: Momento de fijar una cara (empotramiento)

Esto genera la misma situación que los sargentos del laboratorio, crean un empotramiento en la cara que queda fija.

Es el momento de aplicar las cargas, simulando a las pesas reales del laboratorio, y para ello, click derecho en la pestaña de “Cargas externas” y se selecciona la carga puntual.

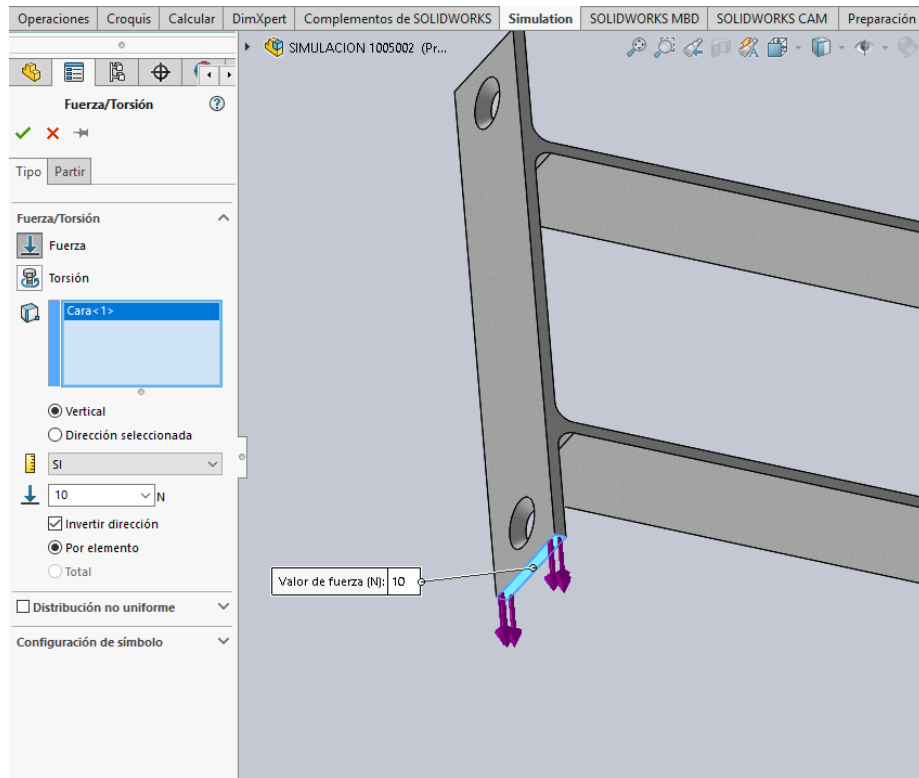


Ilustración 61: Momento de la aplicación de la carga virtual

En la imagen superior se muestra el resultado final, una vez que se ha seleccionado el área marcada en azul, la magnitud de la fuerza se establece en 10N y se debe marcar la opción de “invertir dirección” para que la carga concuerde con el ensayo real, donde las pesas generan una fuerza vertical descendente.

Con esta configuración, la pieza ya está lista para ser ensayada, pero antes se clicka en con el botón derecho de “Análisis estático 1” y se clicka en la opción “Selección de Solver Automática”, hecho esto, botón derecho en la misma pestaña y “Resolver”.

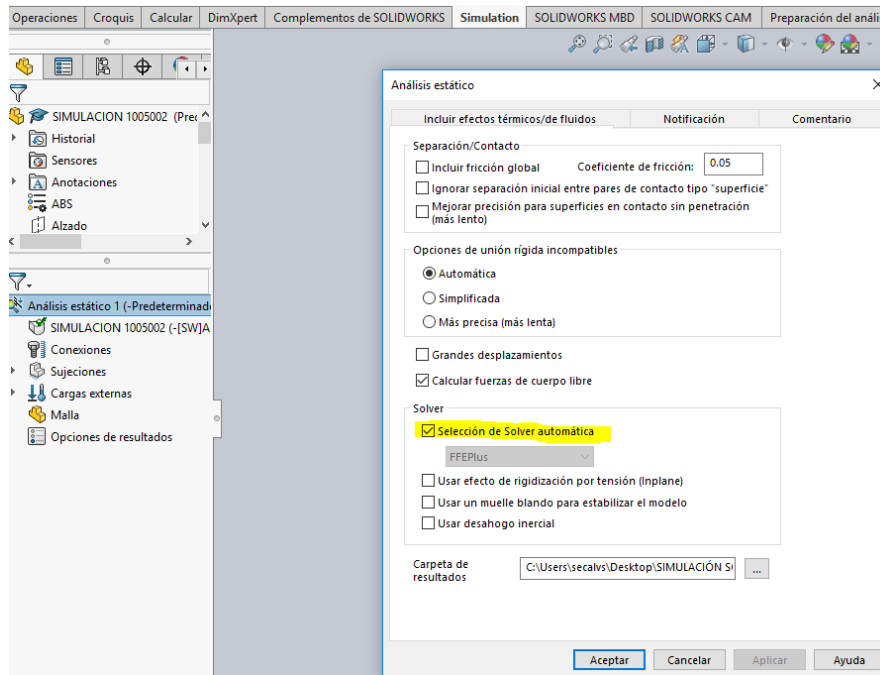


Ilustración 62: Marcado de opción (en amarillo)

El programa ya ha resuelto la estructura, y ahora muestra los resultados en el menú del ensayo.

El dato que más interesa son las deformaciones, por ello se hace click en “Desplazamiento” y se selecciona mostrar.

Para facilitar la visualización, se cambia la nomenclatura de científica a general, y ya se puede observar en la leyenda los valores de deformación, siendo el máximo desplazamiento el correspondiente al que marcaría el calibre de reloj en los ensayos reales.

El programa muestra por defecto el desplazamiento con una escala automática, para su visualización en caso de pequeños desplazamientos como podría ser el caso de una viga de acero. Para este proyecto lo interesante es que se muestre la escala real, para comparar su deformación con las imágenes del laboratorio. Para ello en configuración del gráfico, se selecciona la opción de “escala real”

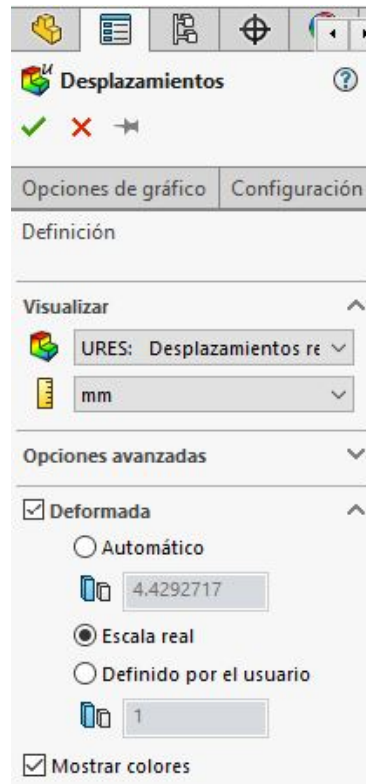


Ilustración 63: Cambios en la definición de los desplazamientos

Ahora la muestra se verá de la misma manera que en el laboratorio.

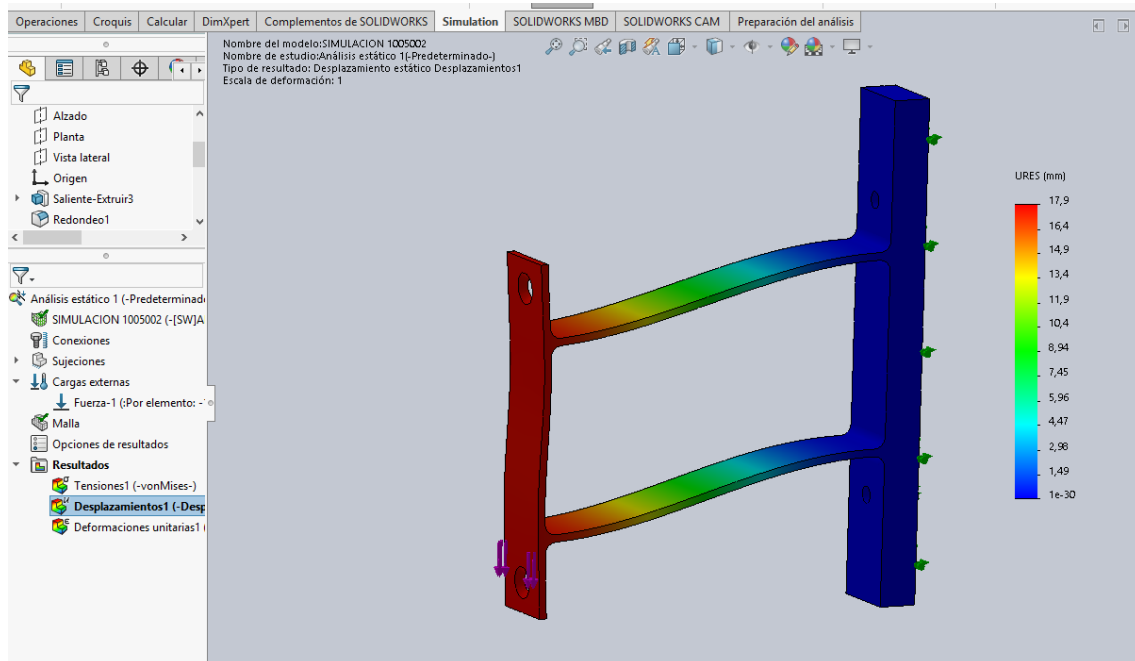


Ilustración 64: Desplazamientos calculados en SolidWorks

Al igual que los desplazamientos, también se pueden observar las tensiones, como se muestra en la siguiente imagen:

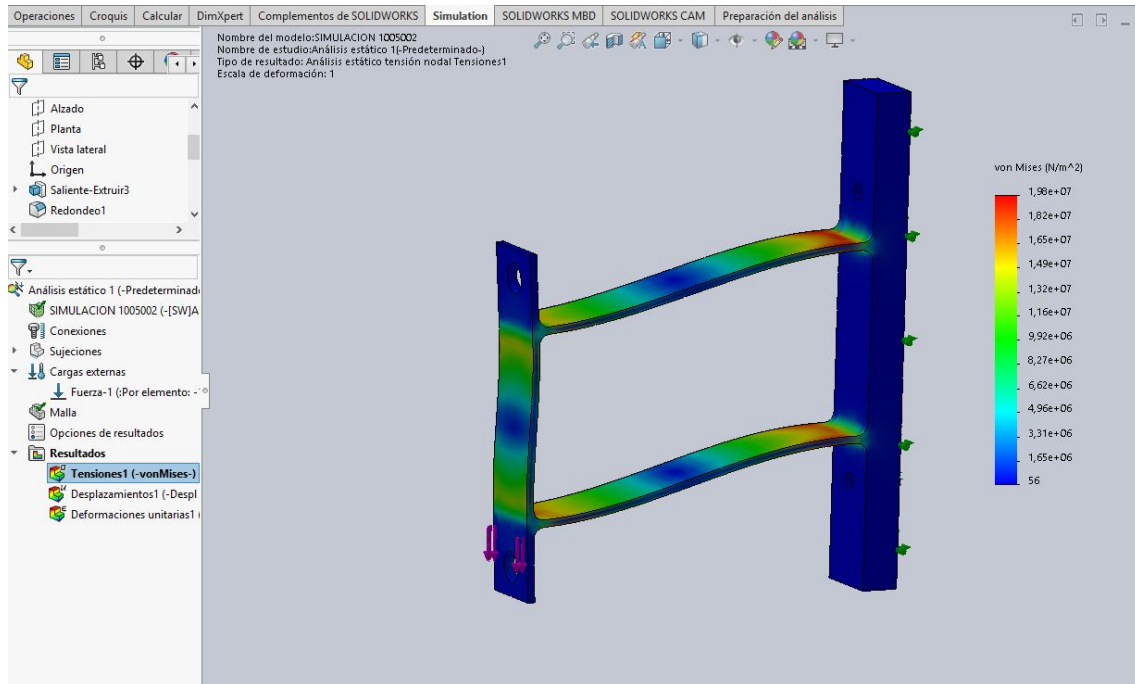


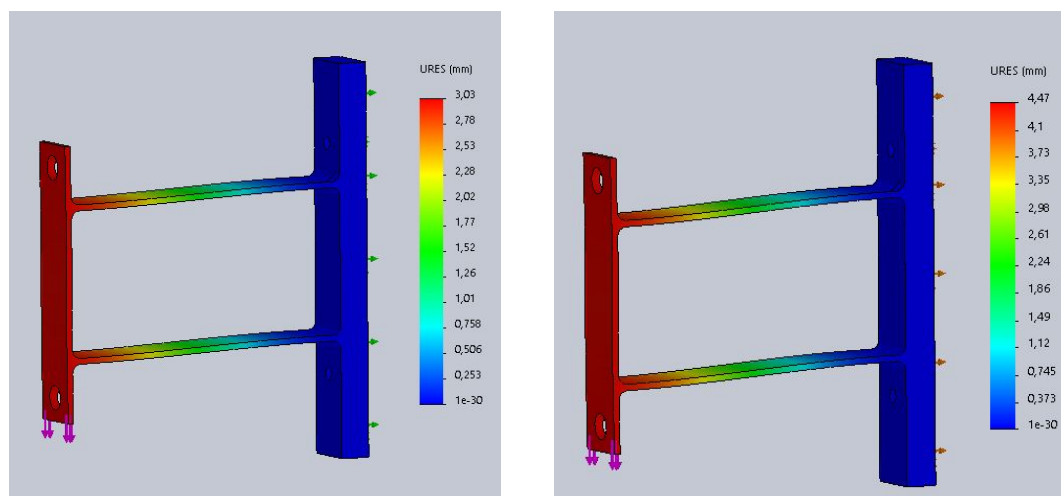
Ilustración 65: Tensiones calculadas en SolidWorks

Estos datos no interesan en este punto del proyecto, pero pueden servir para, en caso de fallo de la pieza, es decir, que rompa en servicio, se podrá localizar la zona más exigida y orientar una modificación del modelo en el refuerzo de esa zona crítica. En este caso, se ve la zona roja, cerca del empotramiento, como la más afectada por la carga.

Esta es la forma que se va a seguir para ensayar los pórticos de forma teórica mediante SolidWorks. Solo será necesario cambiar el dato de la fuerza, para ajustarlo a las fuerzas reales y por tanto obtener los desplazamientos progresivos de la pieza.

Es importante remarcar que las fuerzas verticales, son el sumatorio de la fuerza del muelle del calibre (variable según distancia) junto con las pesas y el soporte del ensayo.

A continuación se muestran los resultados del pórtico para las diferentes cargas:



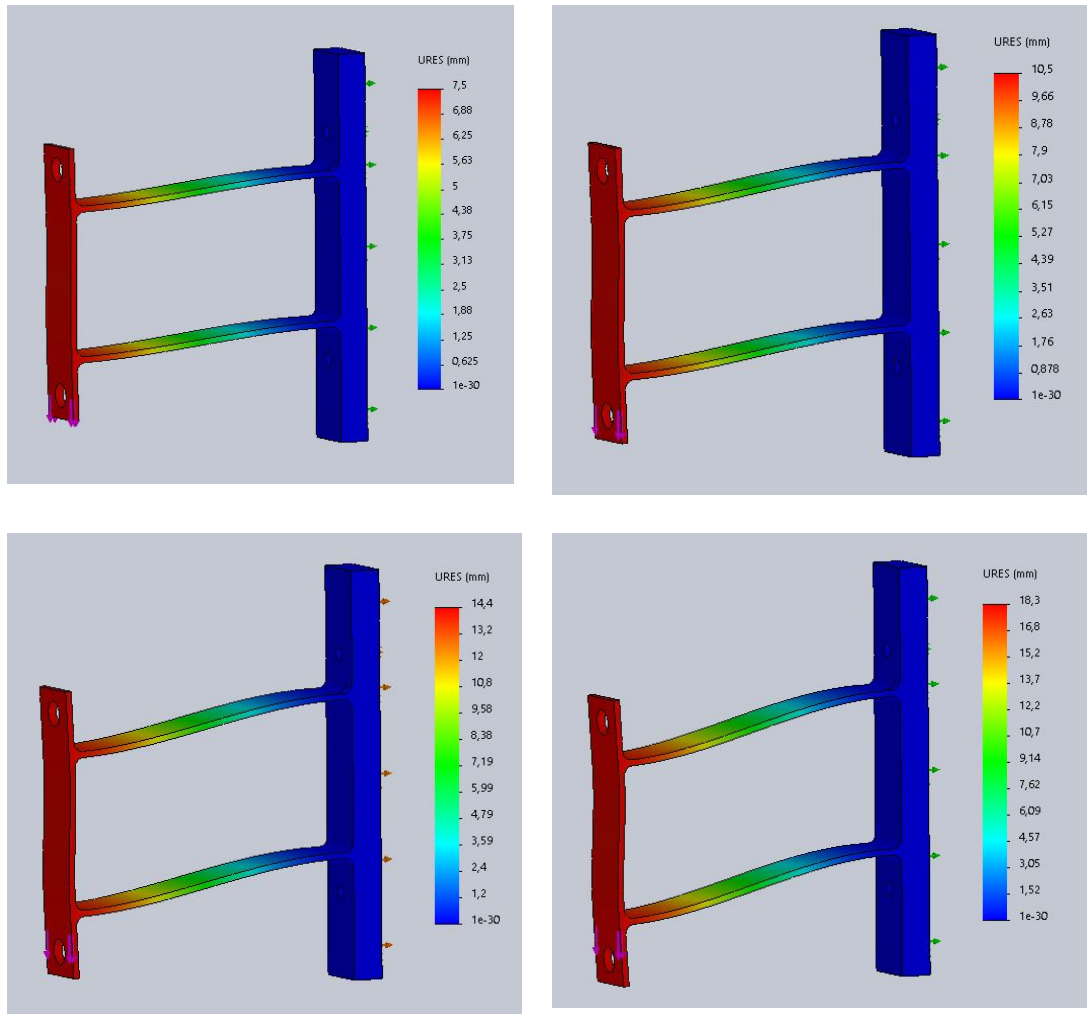


Ilustración 66: Progreso del comportamiento del pórtico a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)

El programa es posible que no refleje la realidad de la deformación en el dibujo, puesto que escala los resultados para una visualización más fácil. En este caso, para asemejarlo a los ensayos del laboratorio, conviene que las deformaciones se ajusten a la realidad para ver la deformación paulatina a medida que las cargas van siendo de mayor magnitud.

Se procede de igual forma para el modelo de PLA, únicamente se debe especificar el material adecuado.

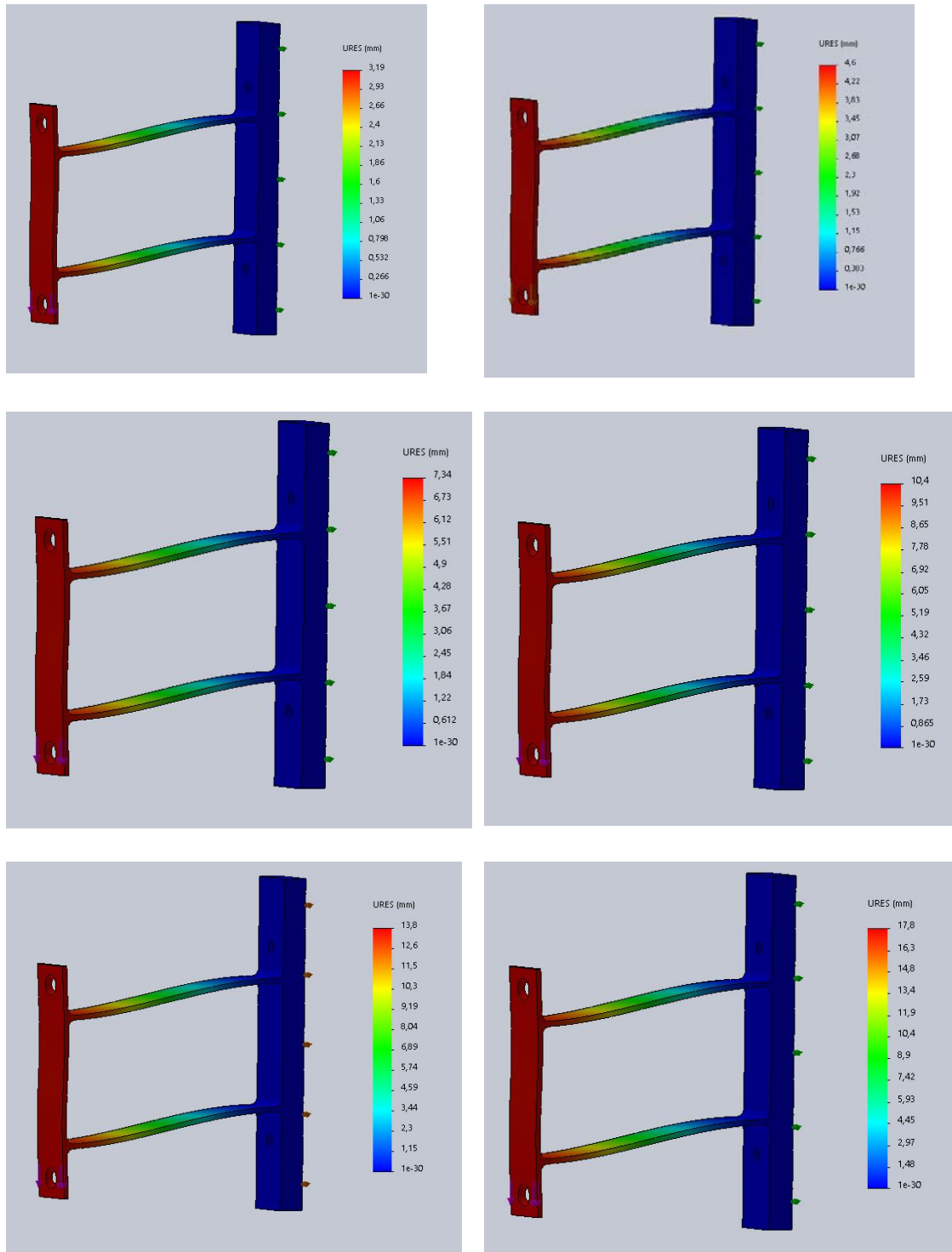


Ilustración 67: Progreso del comportamiento del pórtico a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

11.6 Comparación de los resultados reales frente a los teóricos

Los resultados obtenidos en el laboratorio con los modelos 3D, se comparan con los obtenidos en SolidWorks (tabla XXX)

Material	Cargas [N]	Desplazamientos Reales [mm]	Desplazamientos Teóricos [mm]	Diferencia [mm]
ABS	0	2,459	3,19	0,731
	1	4,195	4,6	0,405
	3	7,065	7,34	0,275
	5	10,113	10,4	0,287
	7,5	14,042	13,8	-0,242
	10	18,116	17,8	-0,316
PLA	0	2,38	2,18	-0,2
	1	3,359	3,27	-0,089
	3	5,216	5,23	0,014
	5	7,186	7,32	0,134
	7,5	9,591	9,91	0,319
	10	12,14	12,5	0,36

Tabla 14: Comparación de resultados teóricos y prácticos para el pórtico de referencia

Las conclusiones y observaciones son las siguientes:

- Las variaciones que se aprecian entre los resultados reales y teóricos son muy bajas, ambos ensayos están muy próximos en los resultados reflejados.
- Es importante suplementar las fuerzas de las pesas conocidas, con las que aporta el muelle del calibre, para que los resultados sean fiables y comparables.

Las variaciones pueden ser debidas a varias cuestiones. Las principales hipótesis son:

- La herramienta SolidWorks entiende la pieza de plástico como una pieza fabricada por inyección y no por impresión 3D.
- La verticalidad total de los ensayos reales no se asegura completamente.
- El proceso de impresión 3D depende de muchas variables que no se pueden controlar, como la humedad y temperatura de la sala, o las corrientes de aire. Todas estas variables pueden afectar a la impresión de la pieza.
- La fuerza que ejerce el muelle del calibre se estima con bastante exactitud, pero no al 100%.

En todo caso los resultados coinciden con una tolerancia muy pequeña, y por tanto se estas hipótesis pueden despreciarse por su baja intervención en la modificación de los datos finales.

11.7 Ensayos de los pórticos con diferentes modificaciones de cotas

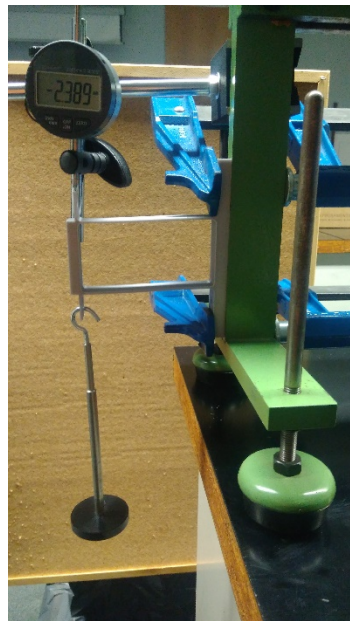
Pórticos con $L=100\text{mm}$ y $H=8\text{mm}$

Los siguientes dos ensayos, son realizados con exactamente el mismo modelo que el base, pero con la viga cambiada y multiplicando su espesor por 4. En principio se espera un comportamiento más rígido tanto en PLA como en ABS, por razones obvias (aumento del material).

Características dimensionales:

L	100 mm
W	50 mm
H	8 mm
E	20 mm

Los ensayos fueron realizados de la misma manera que los anteriores obteniéndose los siguientes resultados.



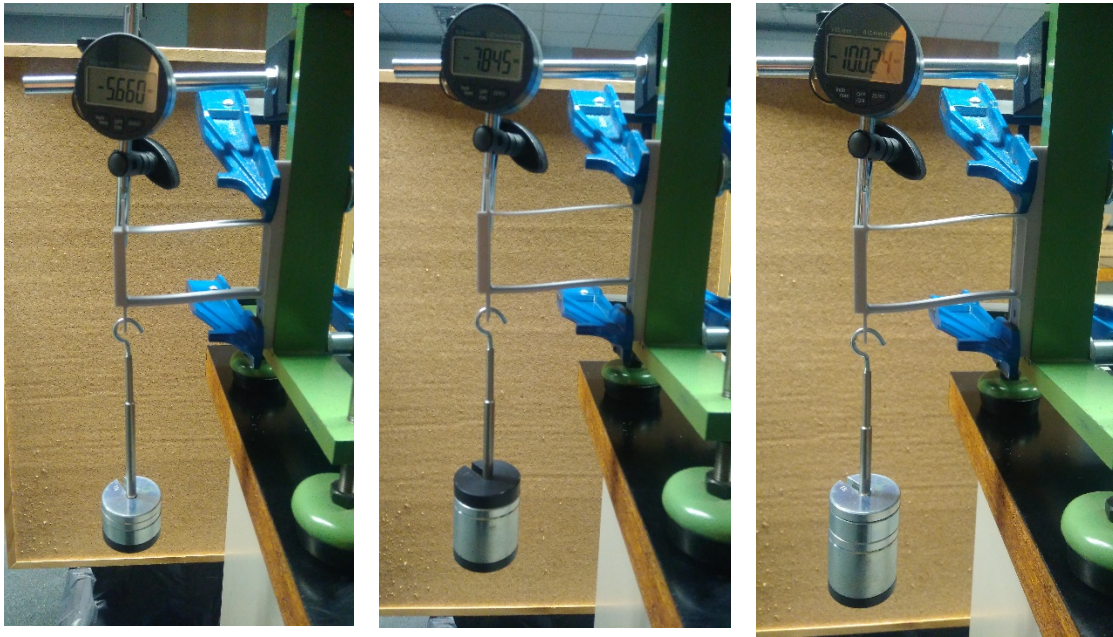
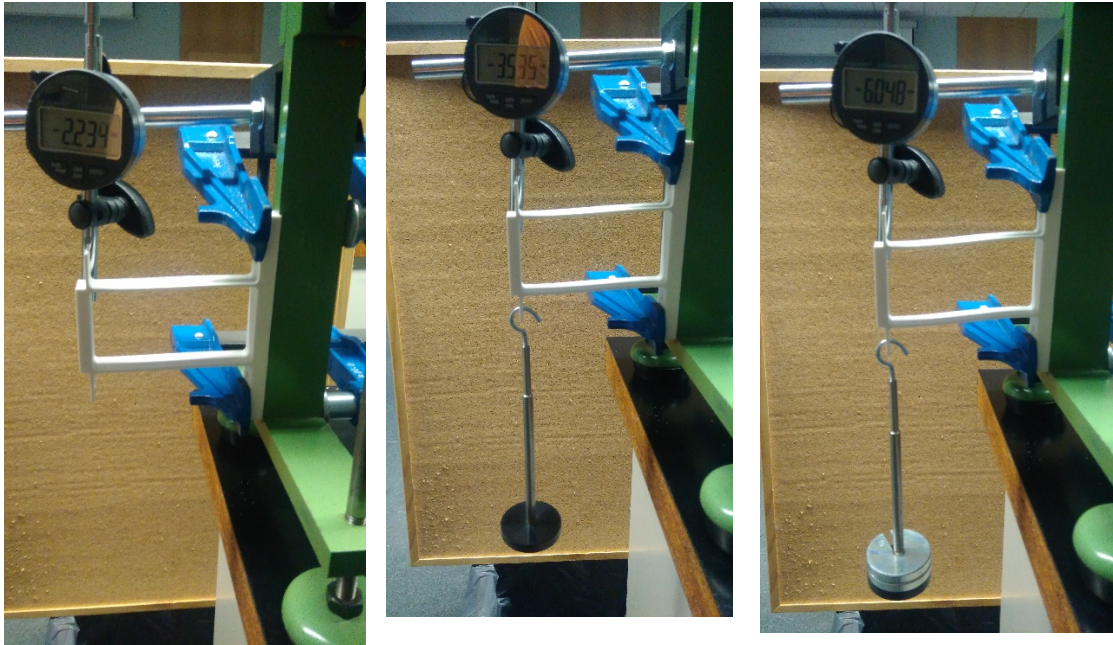


Ilustración 68: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en laboratorio (PLA)

PLA					
0N	1N	3N	5	7,5N	10N
1,5mm	2,389mm	3,992mm	5,66mm	7,845mm	10,024mm

También se fabricaron los mismos modelos en ABS, y los resultados obtenidos fueron los que se muestran a continuación:



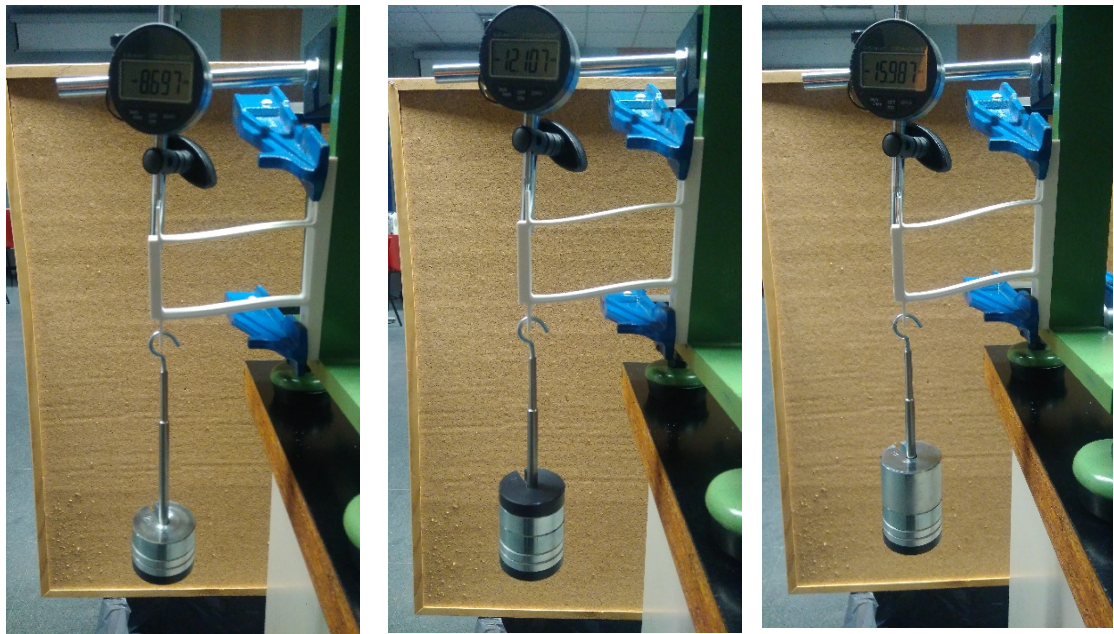


Ilustración 69: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)

ABS					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
2,233mm	2,535mm	6,048mm	8,697mm	12,107mm	16,027mm

Se construye el siguiente gráfico comparativo entre ambos materiales:

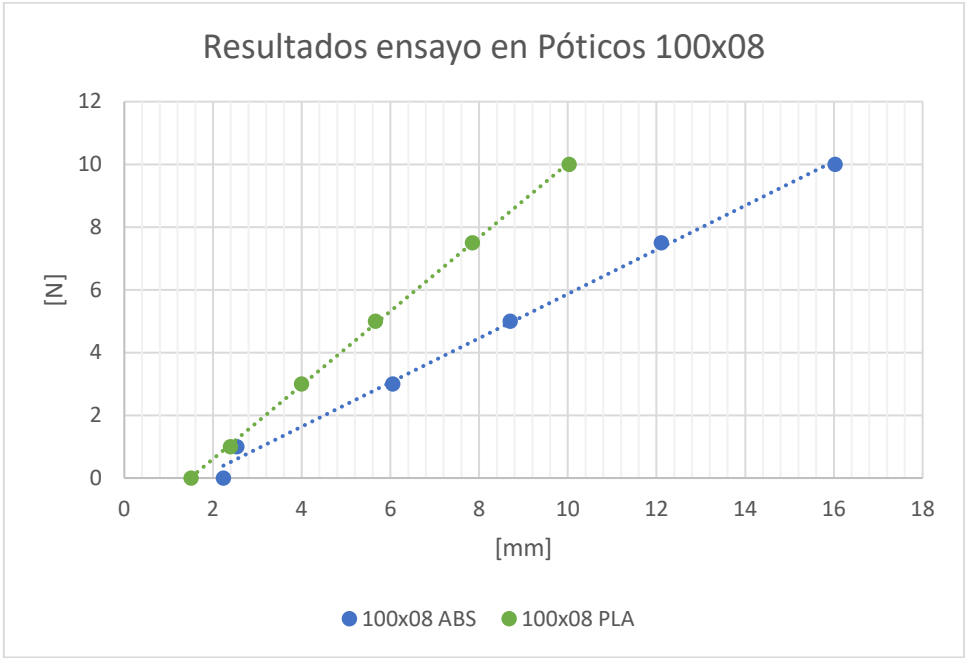


Tabla 15: Comparación pórticos 100x08

El comportamiento lineal se mantiene también en este gráfico.

Hay que destacar que el cambio de modelo, al cambiar la cota H y aumentar su espesor se reduce el desplazamiento ligeramente. Por ejemplo en el PLA, se pasa de 12,14 mm en el modelo 100x02 a 10,024 mm en 100x08, una reducción de 2,116 mm

Ahora se procede a realizar el ensayo teórico mediante SolidWorks.

En primer lugar, se observan los modelos impresos en PLA.

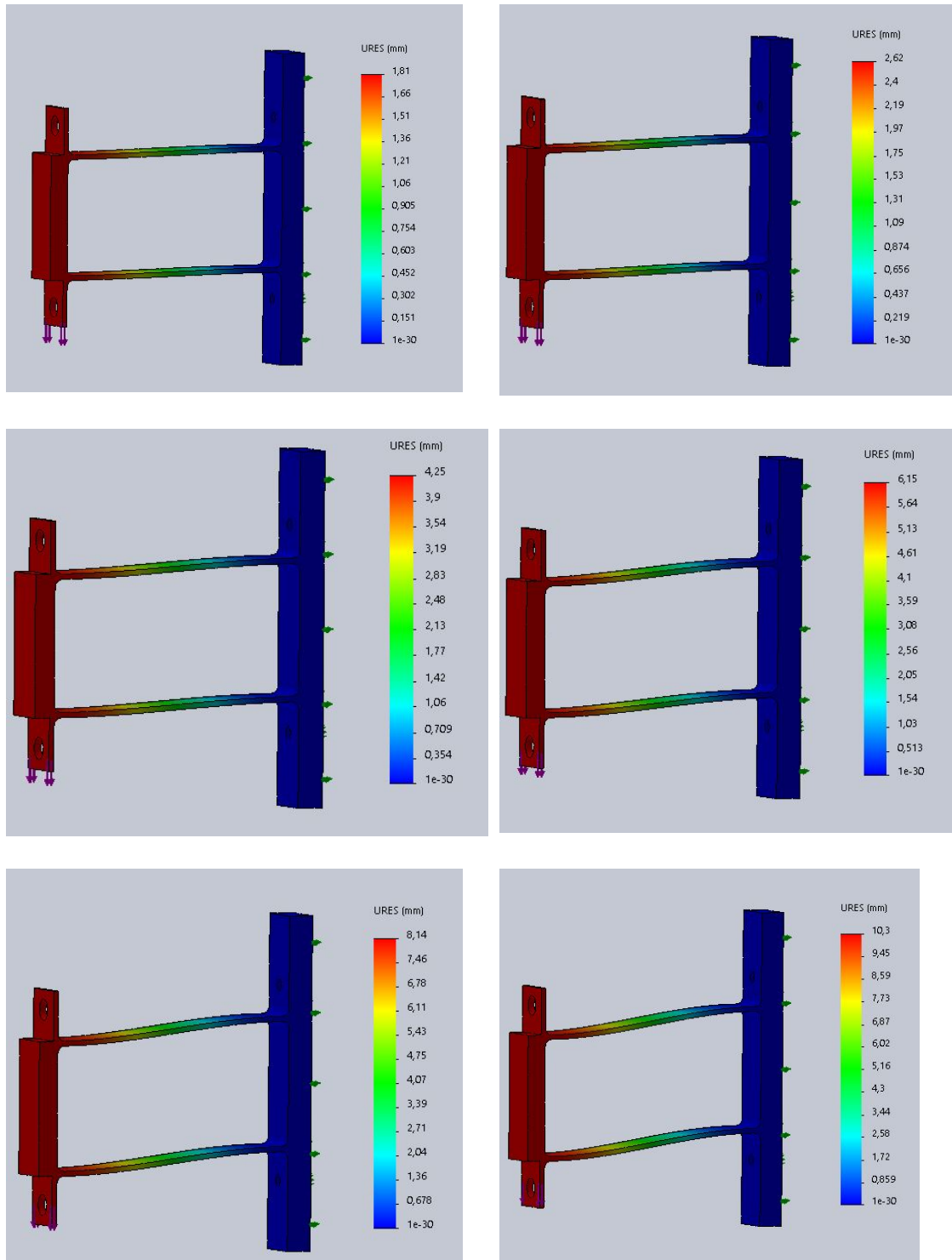


Ilustración 70: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

Mismo proceso para los pórticos 100x08 en ABS.

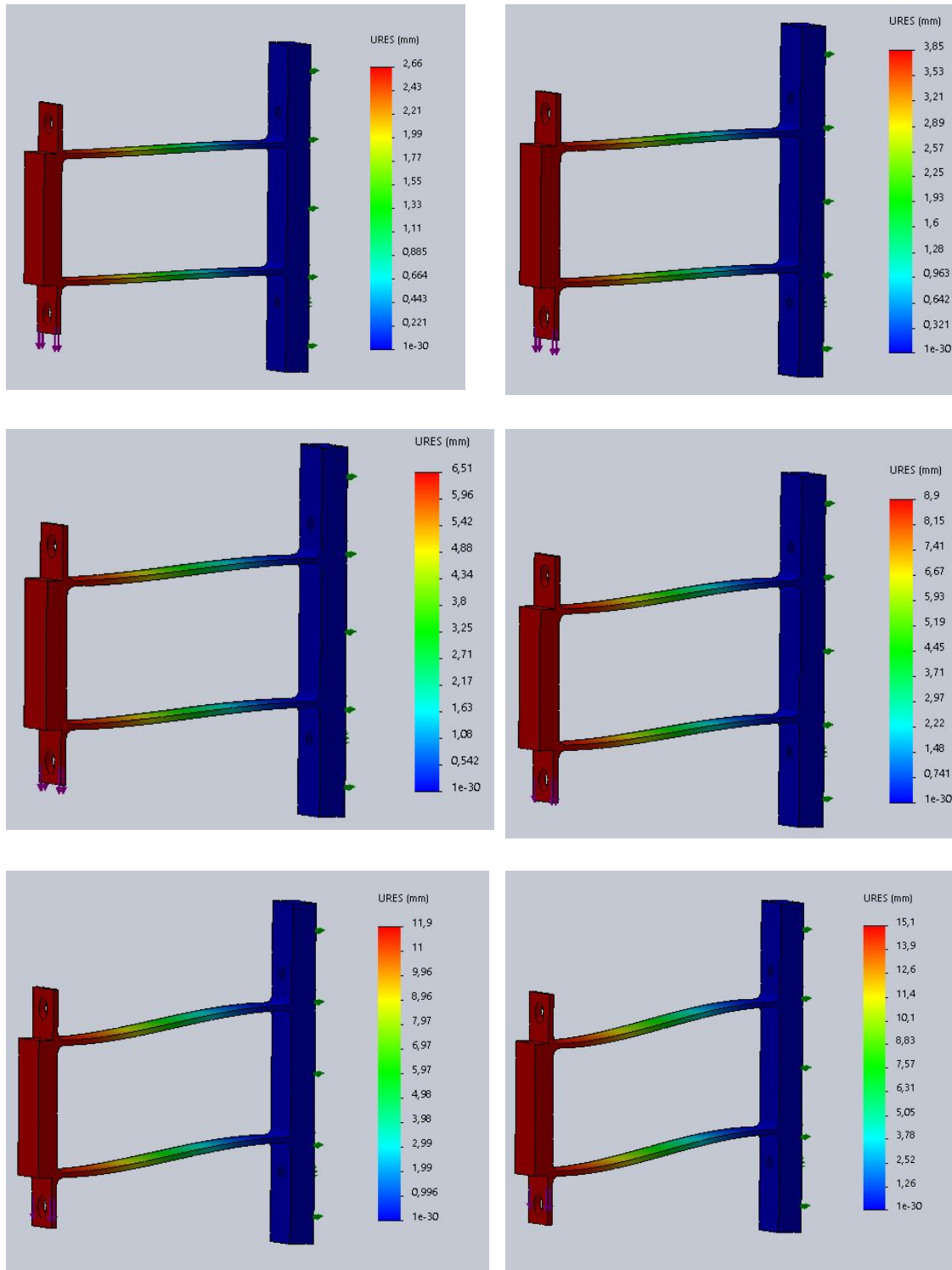


Ilustración 71: Progreso del comportamiento del pórtico (100x08) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)

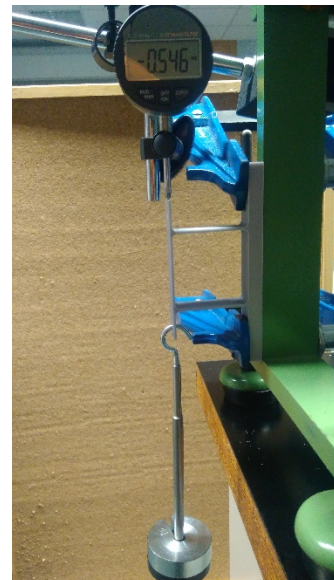
Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

Pórticos con $L=50\text{mm}$ y $H=2\text{mm}$

El siguiente modelo que se ensaya es el mismo que el modelo base, pero disminuyendo la cota L a la mitad

Características dimensionales:

L	50 mm
W	50 mm
H	2 mm
E	20 mm



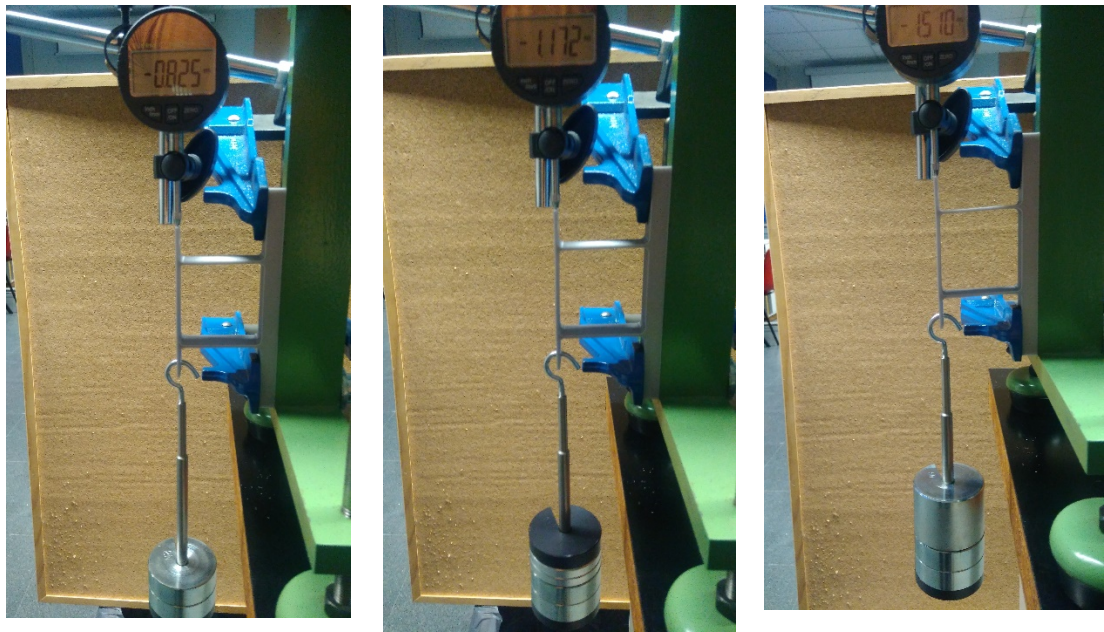
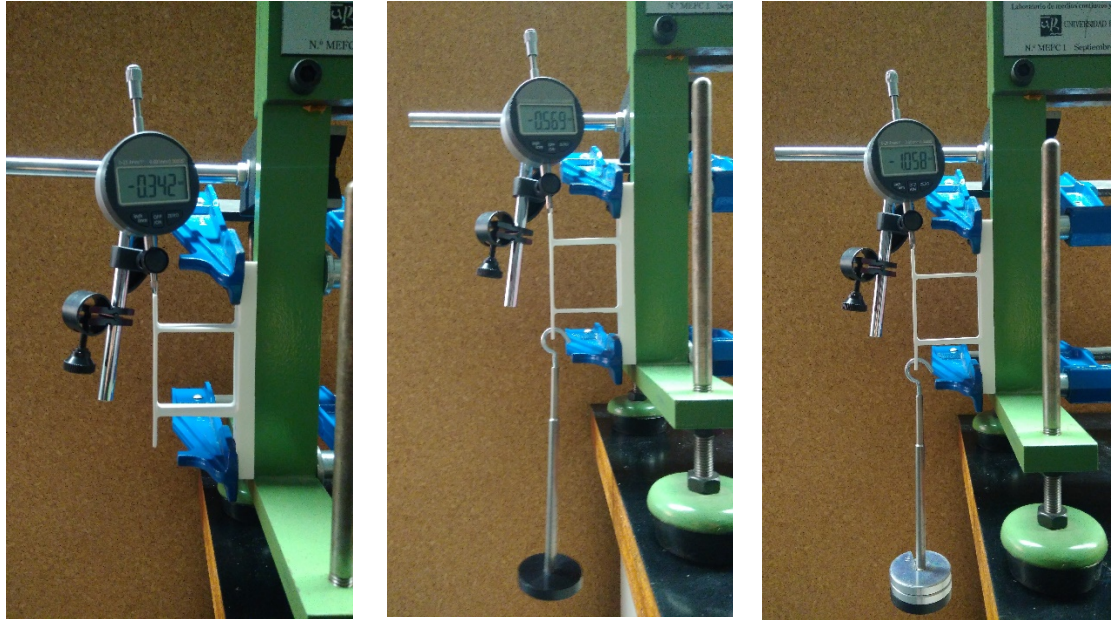


Ilustración 72: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)

PLA					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
0,126mm	0,274mm	0,546mm	0,825mm	1,172mm	1,51mm



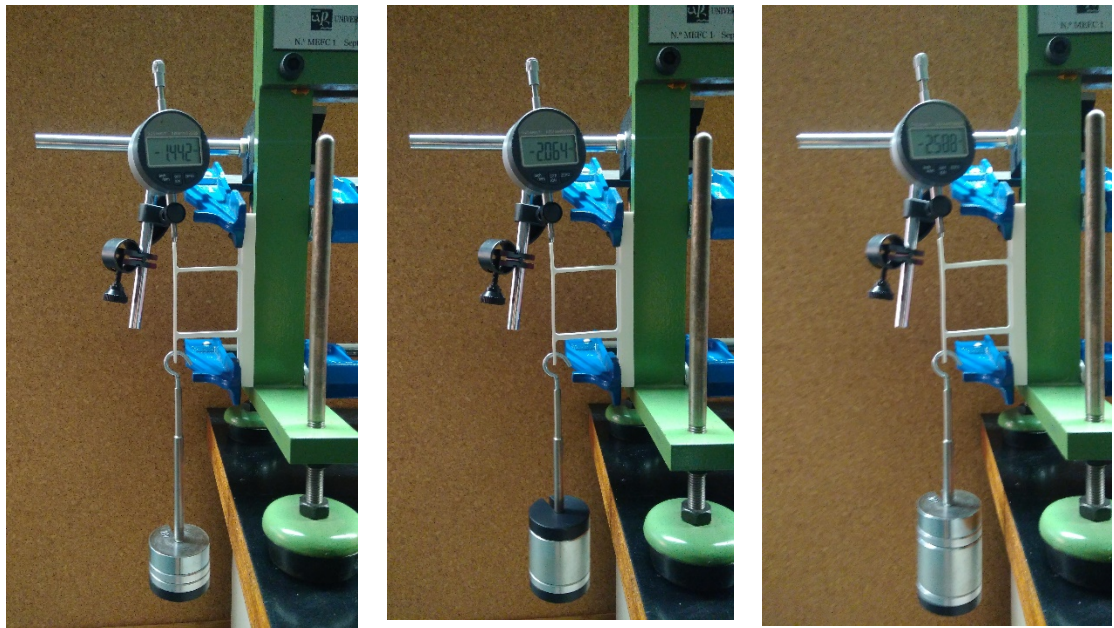


Ilustración 73: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)

ABS					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
0,342mm	0,569mm	1,058mm	1,444mm	2,064mm	2,588mm

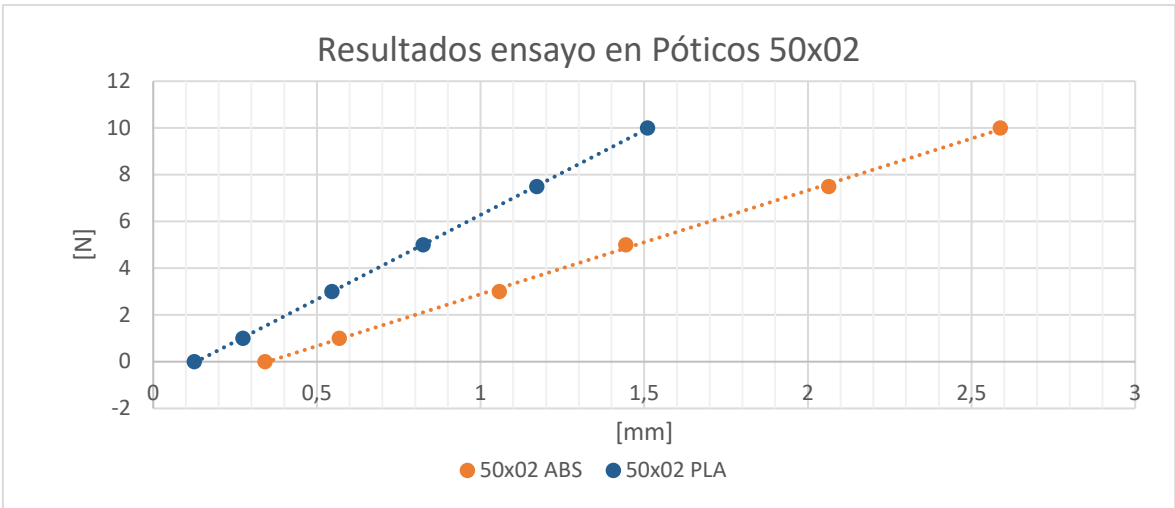


Tabla 16: Comparación ensayos pórticos 50x02

Las deformaciones en los pórticos se han reducido notablemente en los ensayos del laboratorio, se comprueba que en el cálculo teórico aparece la misma tendencia:

Pórticos en PLA:

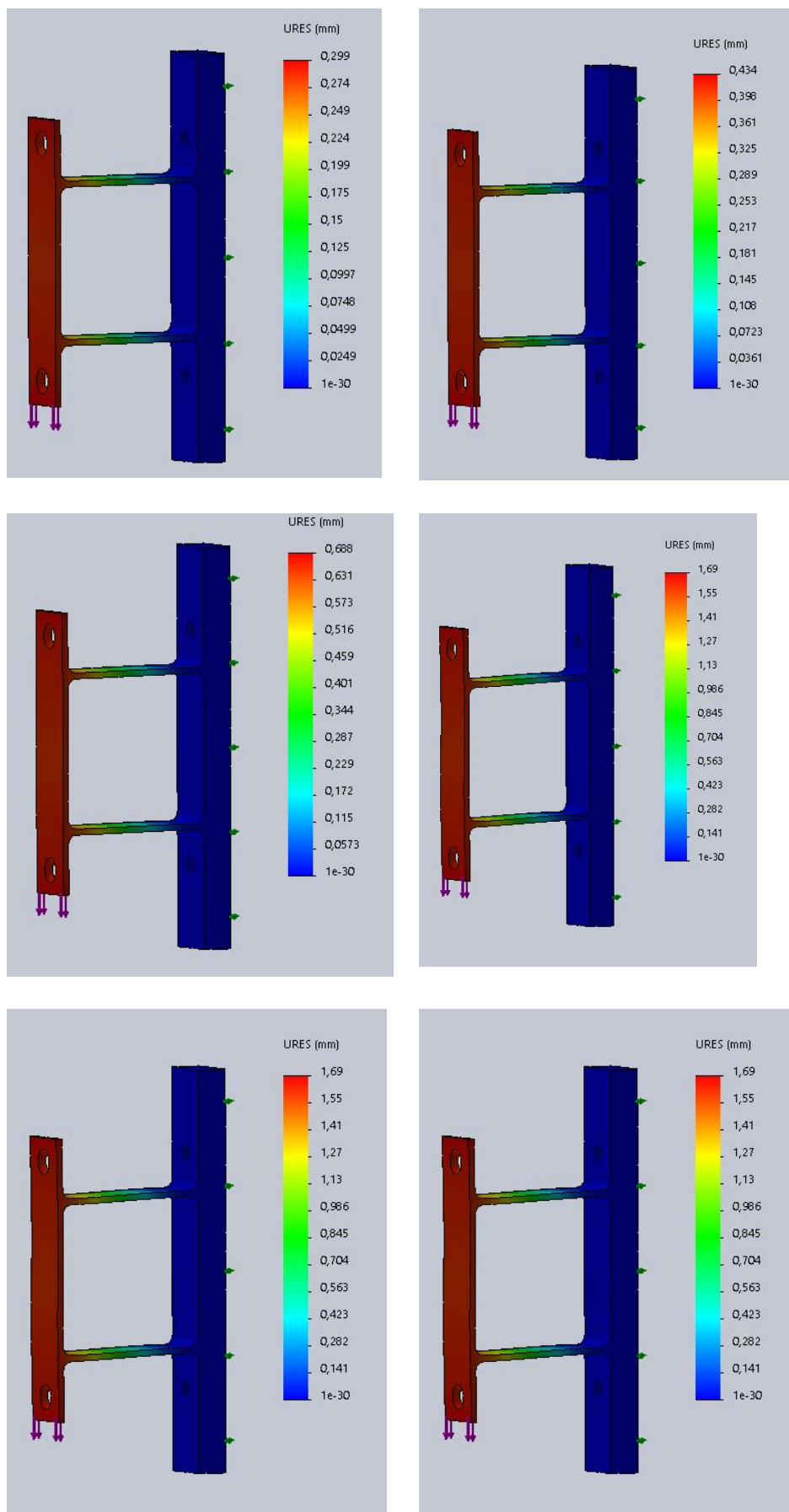


Ilustración 74: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en SolidWorks(PLA)

Pórticos en ABS:

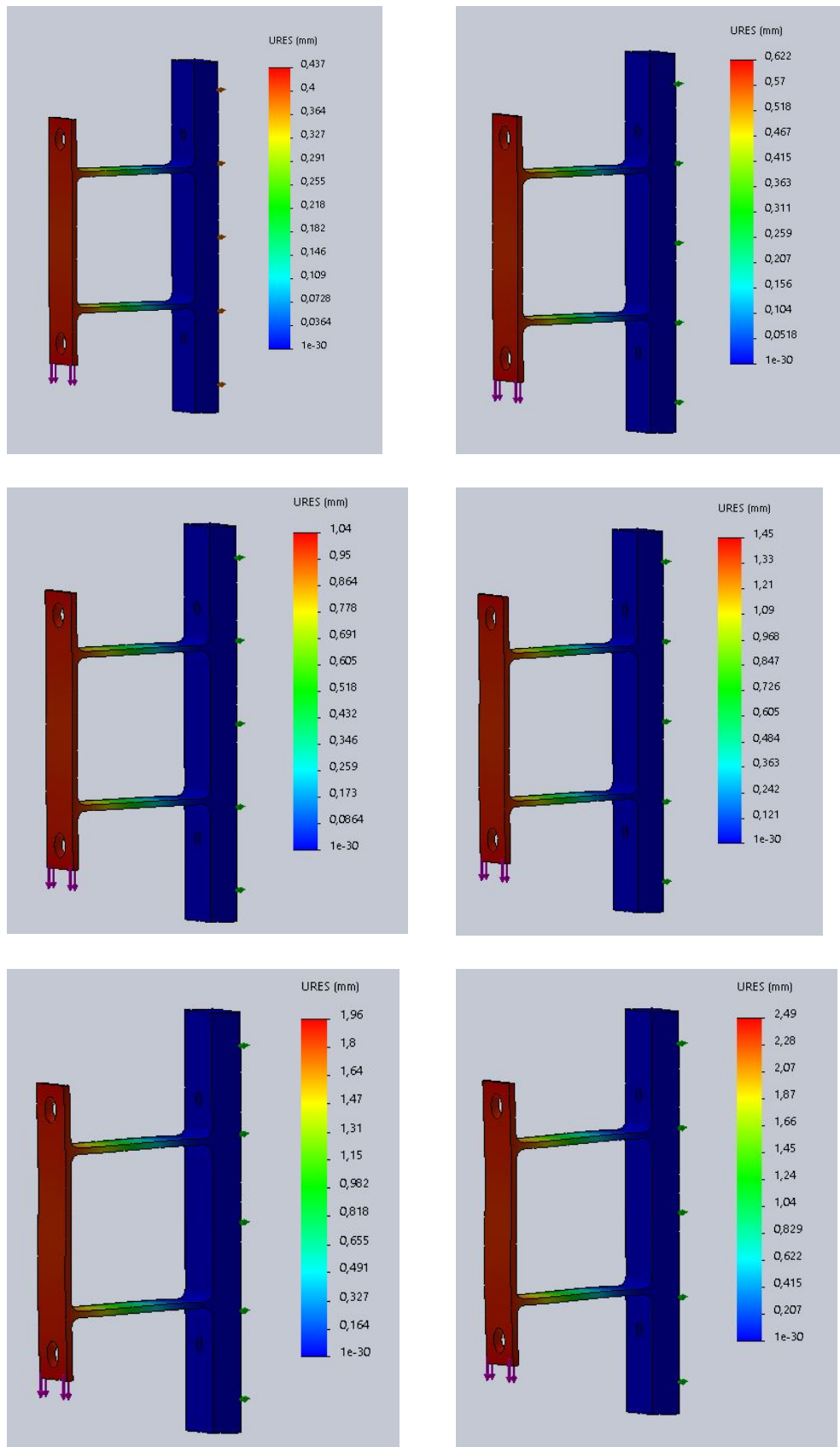


Ilustración 75: Progreso del comportamiento del pórtico (50x02) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)

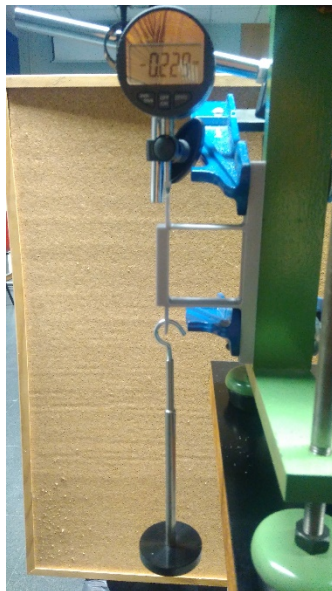
Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

Pórticos con $L=50\text{mm}$ y $H=08\text{mm}$

Al igual que anteriormente con los pórticos de $L=100\text{ mm}$, se eleva la magnitud de la cota H hasta los 8mm .

Por tanto, las características dimensionales son:

L	50 mm
W	50 mm
H	8 mm
E	20 mm



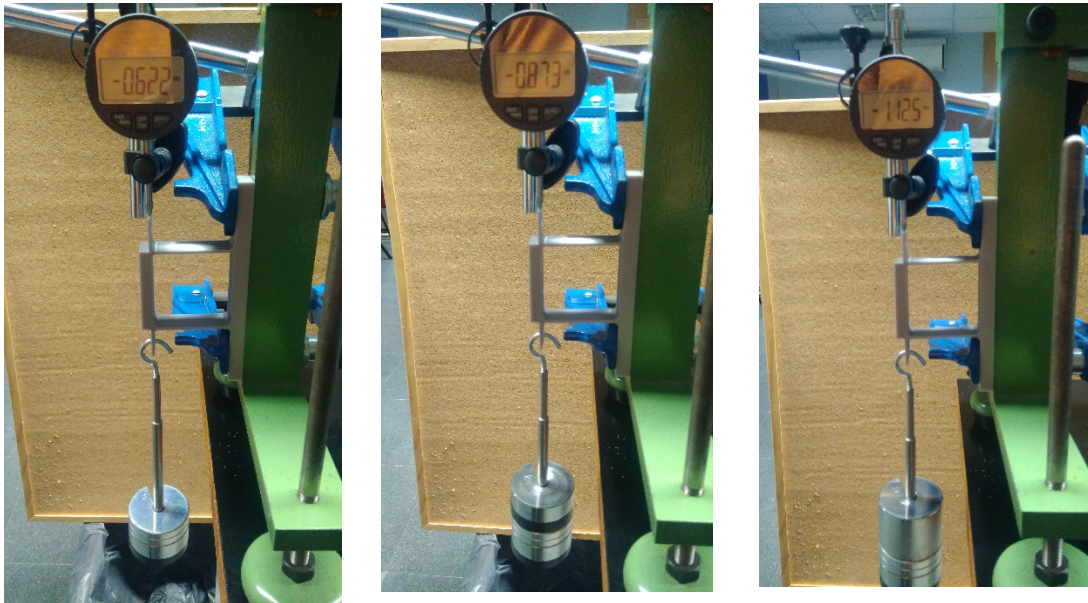
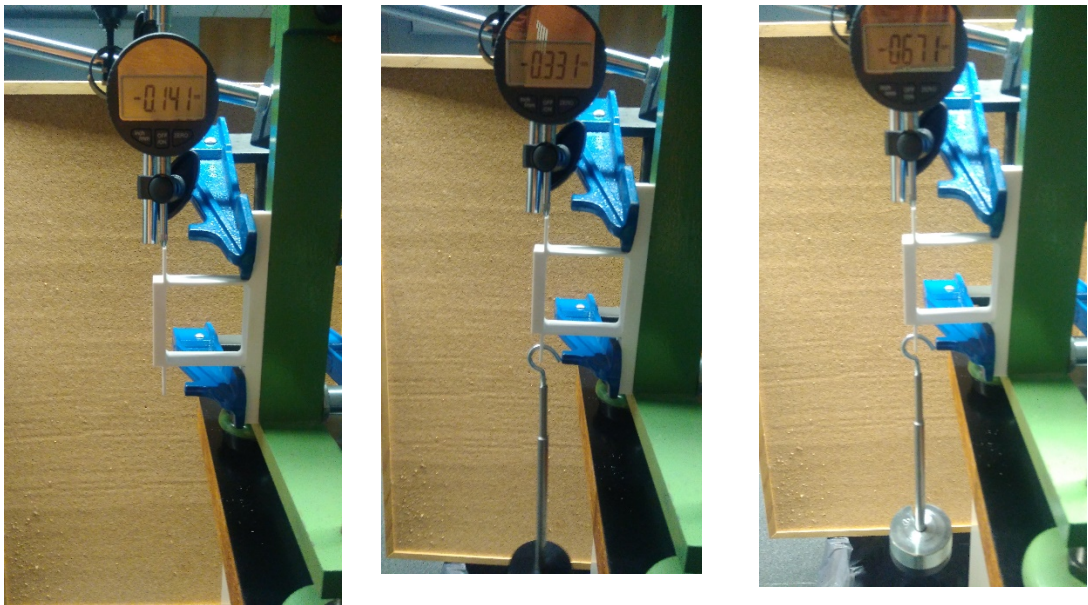


Ilustración 76: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)

PLA					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
0,13mm	0,229mm	0,427mm	0,622mm	0,873mm	1,125mm



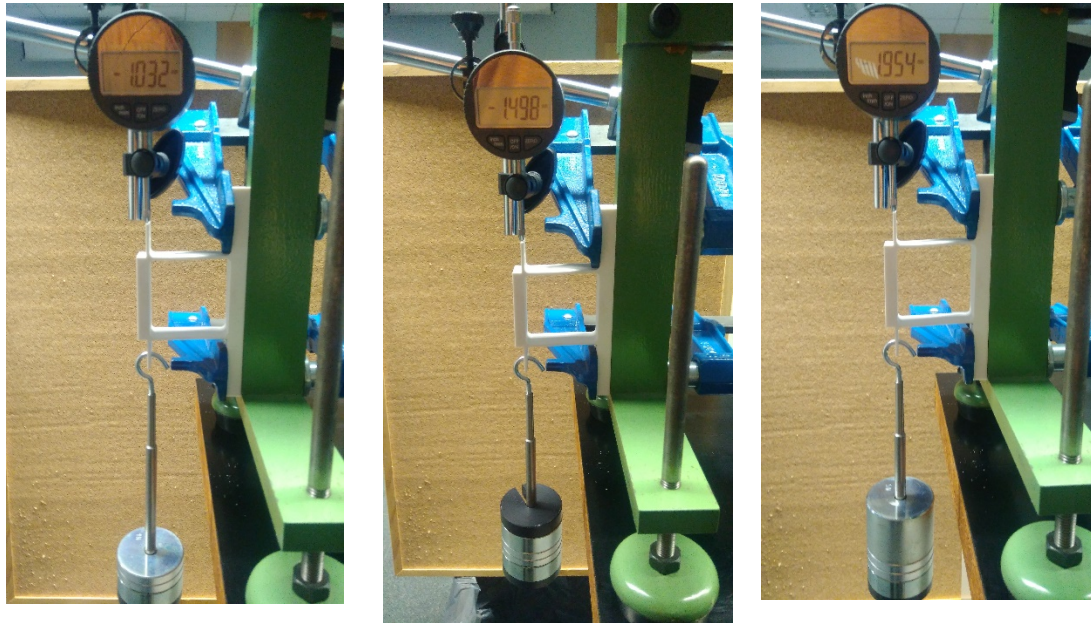


Ilustración 77: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)

ABS					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
0,141mm	0,331mm	0,671mm	1,032mm	1,498mm	1,954mm

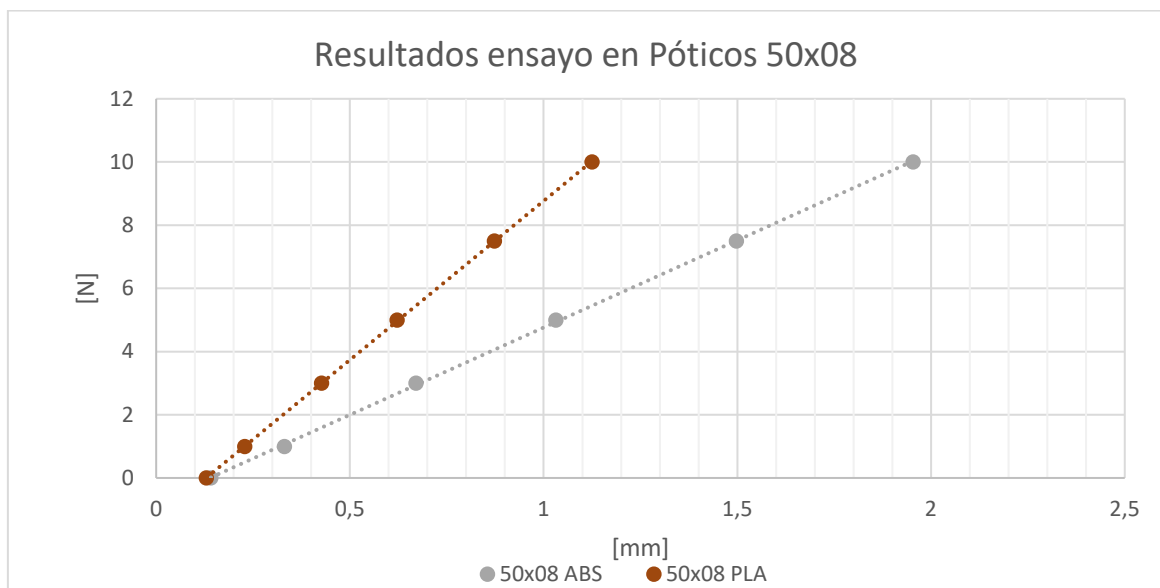


Tabla 17: Comparación de resultados pórticos (50x08):

Este modelo es el más rígido de los 6, con una gran diferencia frente al resto puesto que incluso con los 10N de fuerza aplicada, el desplazamiento oscila entre 1 o 2 mm, según el material de fabricación.

Se comprueba en el ensayo teórico:

En primer lugar los pórticos de PLA

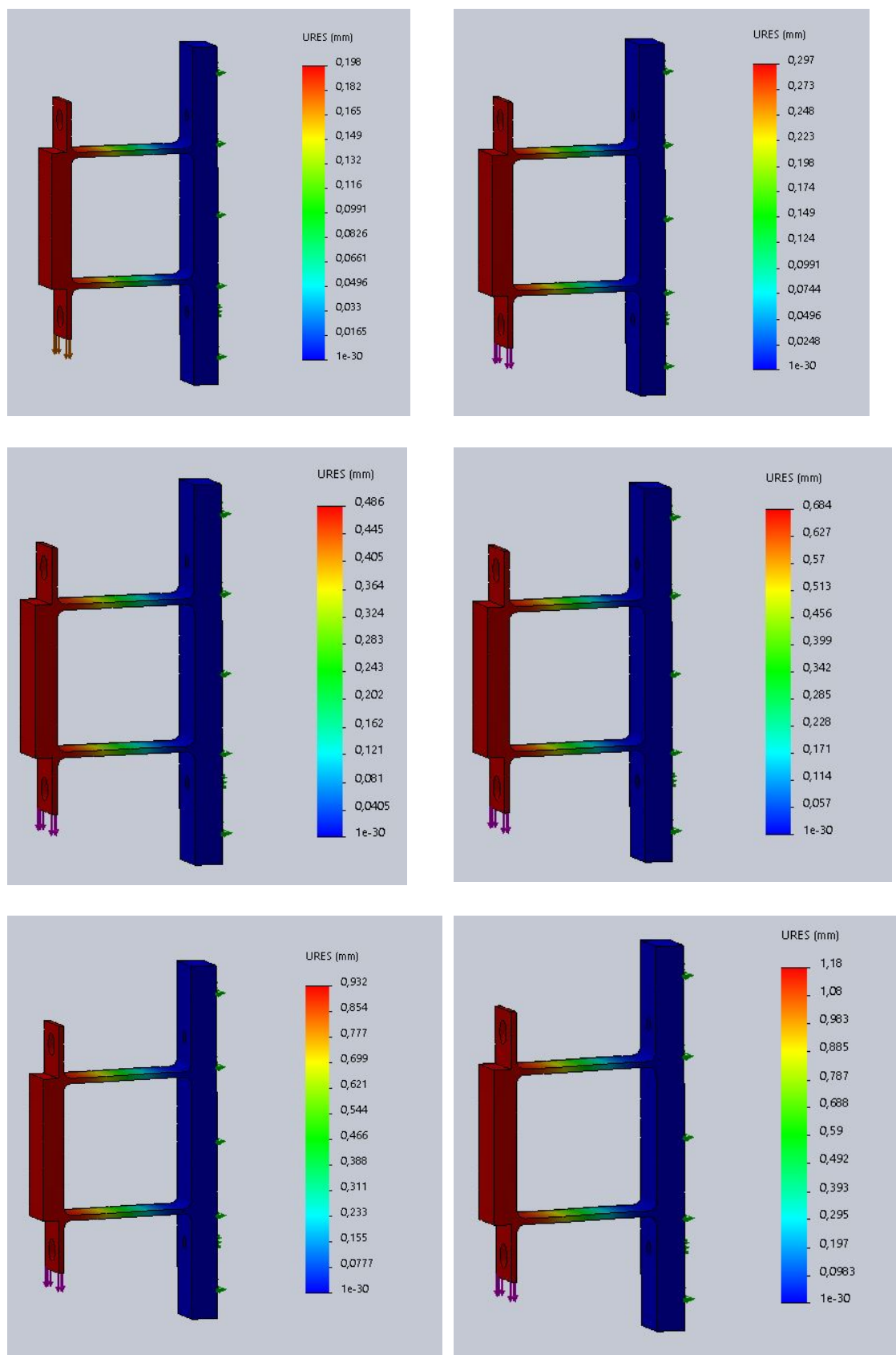


Ilustración 78: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

De igual modo para los pórticos impresos en ABS:

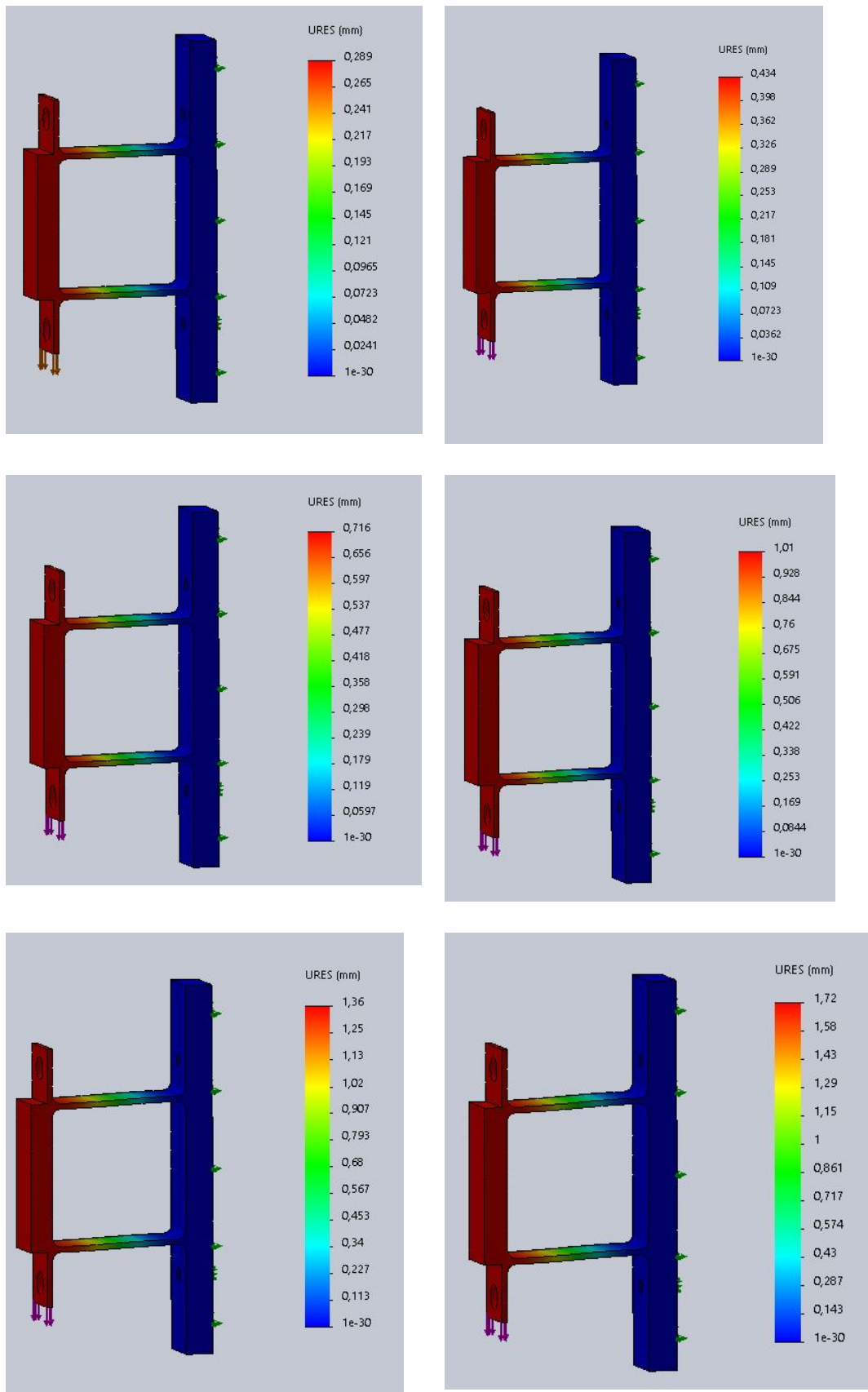


Ilustración 79: Progreso del comportamiento del pórtico (50x08) a diferentes cargas en SolidWorks(ABS)

Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

Pórticos con $L=150\text{mm}$ y $H=2\text{mm}$

Para llevar a las estructuras a deformaciones críticas, se aumenta la cota L hasta los 150mm

Las cargas se aplican de igual forma y con los mismos valores que en los anteriores, pero en este caso, cuando el calibre llegue a su máximo, el ensayo se dará por concluido puesto que ya no habrá más margen de medición, y la estructura corre riesgo de romper.

PLA:

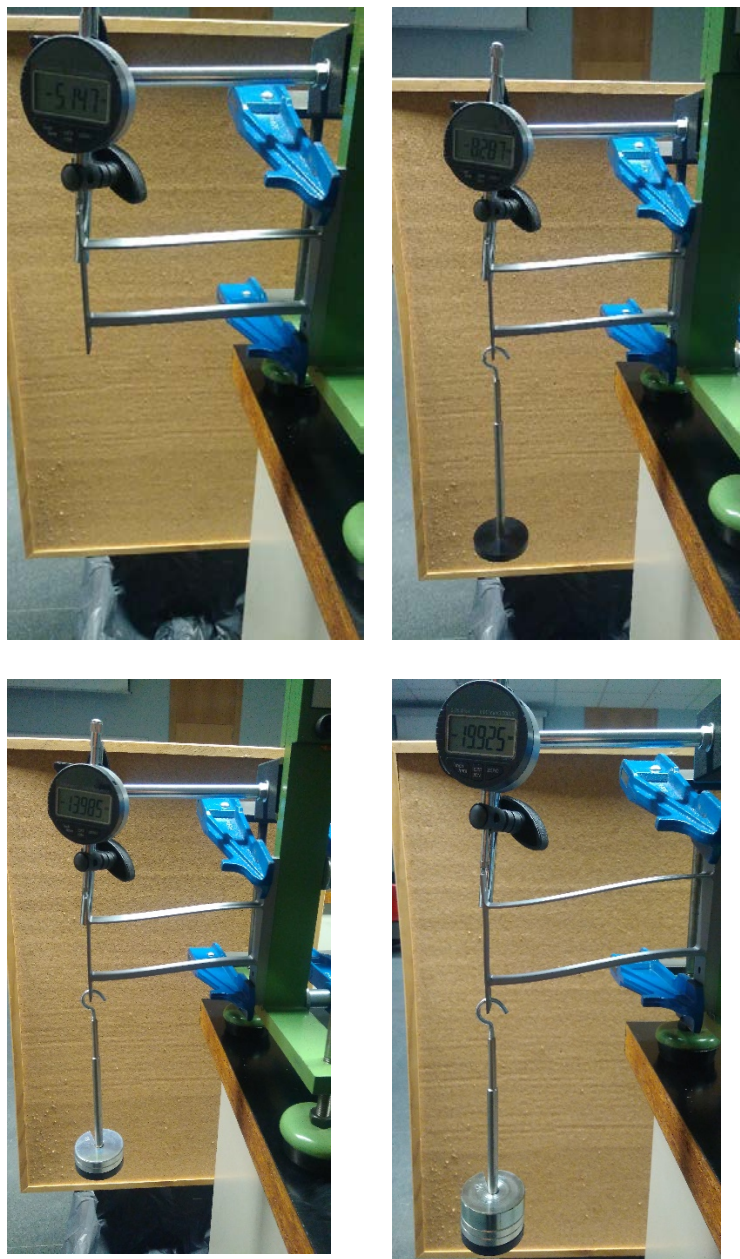


Ilustración 80: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)

PLA				
0N	1N	3N	5N	7,5N
5,147mm	8,287mm	13,985mm	19,925mm	26,265mm

ABS:



Ilustración 81: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)

ABS			
0N	1N	3N	5N
8.16mm	12.229mm	20.917mm	25.894mm

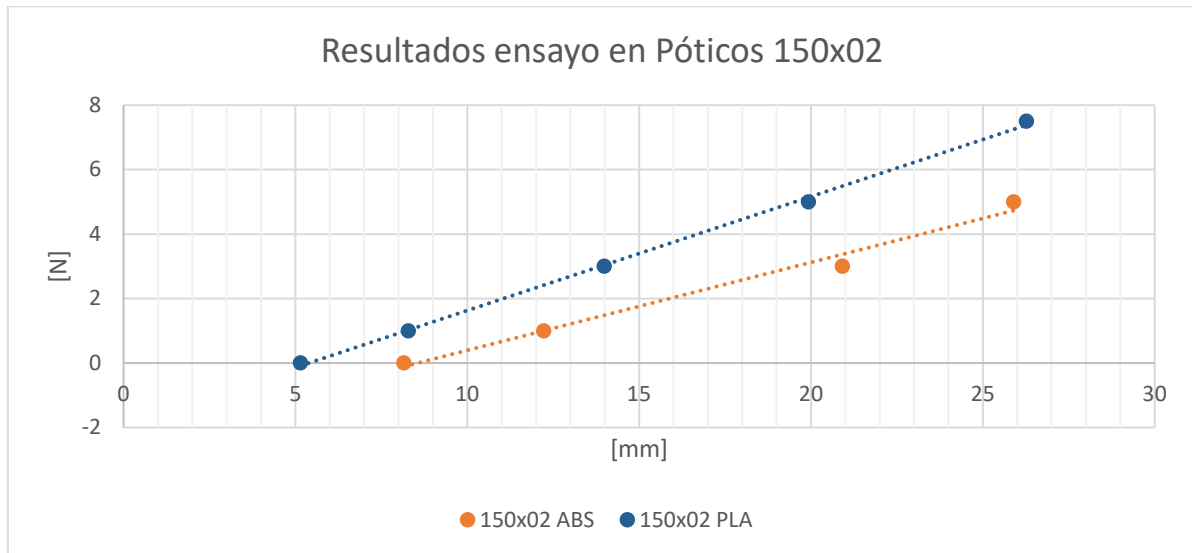
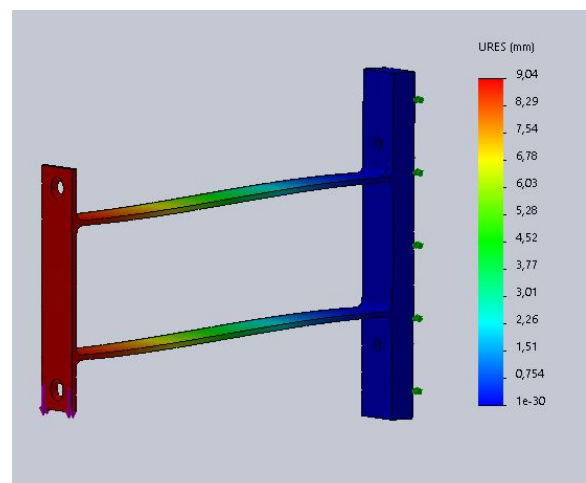
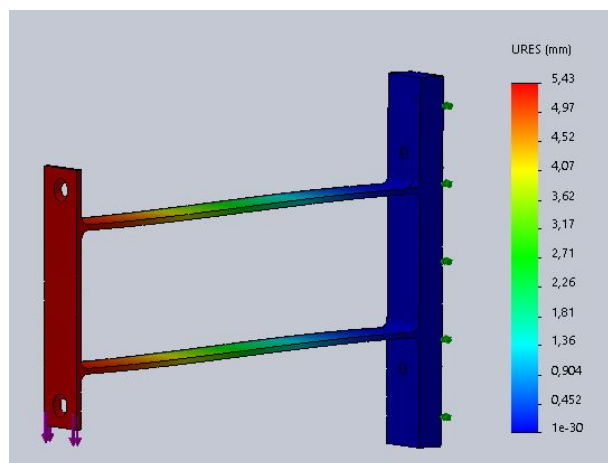


Tabla 18: Comparación entre pórticos 150x02

Los pórticos de PLA en simulación se resuelven de la siguiente manera:



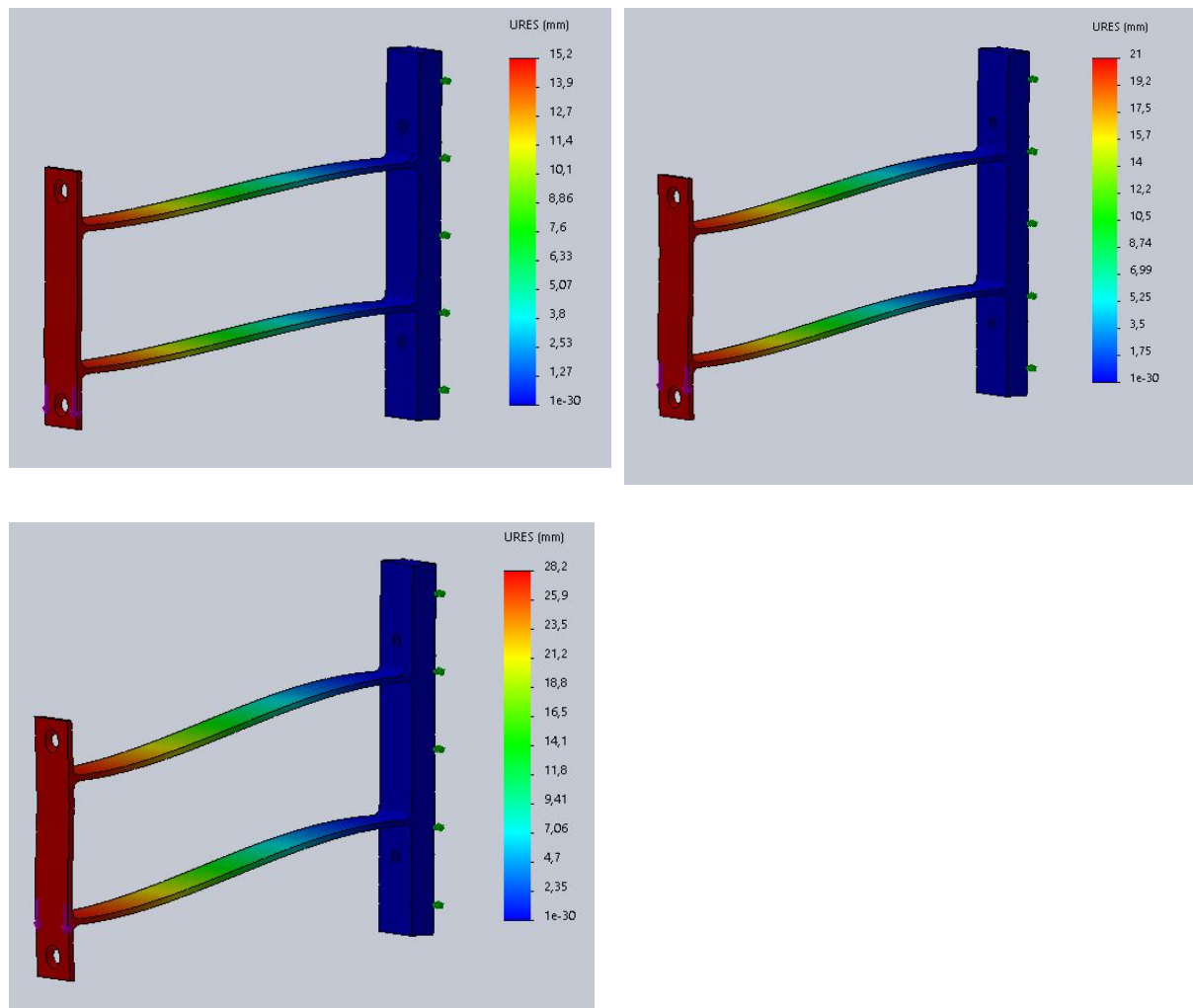
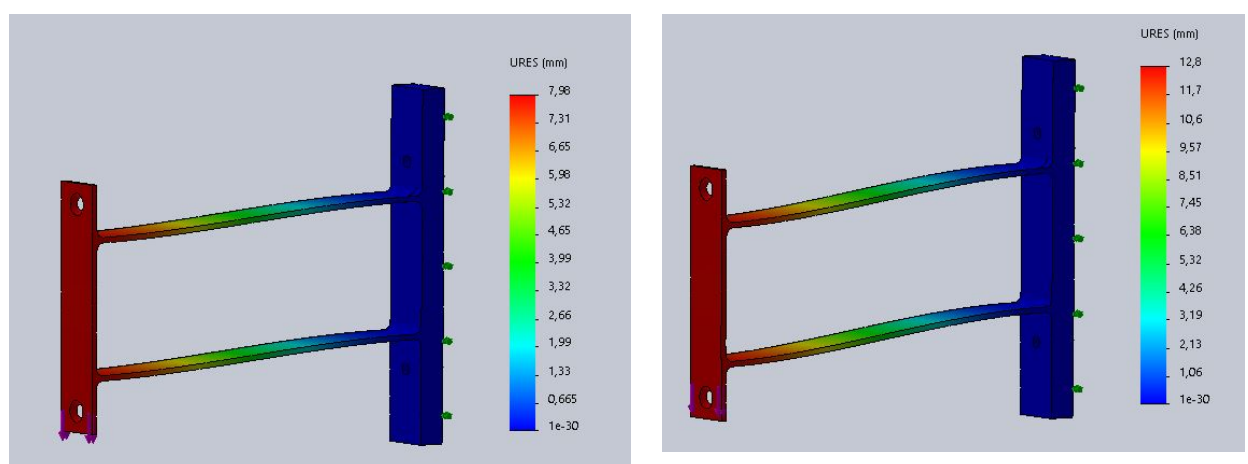


Ilustración 82: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

Para el mismo pórtico impreso en ABS:



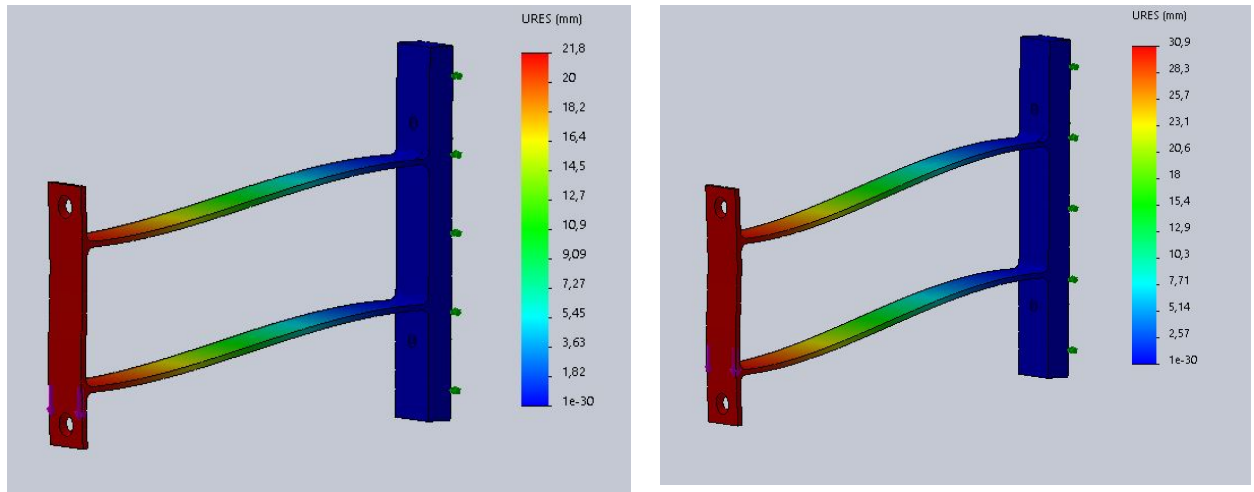


Ilustración 83: Progreso del comportamiento del pórtico (150x02) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)

Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

Pórticos con $L=150\text{mm}$ y $H=8\text{mm}$

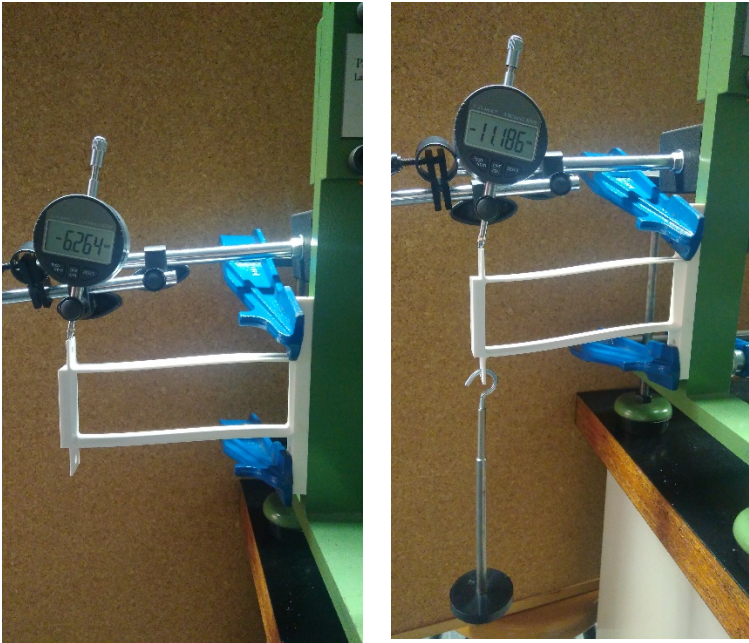
Se implementa la modificación de aumento de la cota L hasta los 8 mm al igual que en el resto de pórticos. Se espera una reducción del desplazamiento.





Ilustración 84: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en Laboratorio(PLA)

PLA				
0N	1N	3N	5N	7,5N
5,425mm	8,018mm	13,165mm	18,703mm	23,488mm



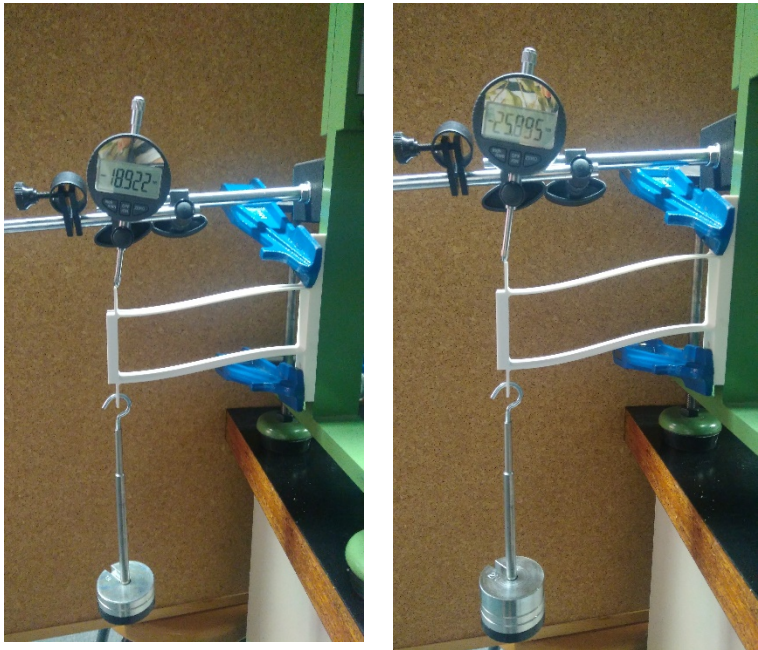


Ilustración 85: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en Laboratorio (ABS)

ABS			
0N	1N	3N	5N
6.265mm	11.186mm	18.992mm	25.895mm

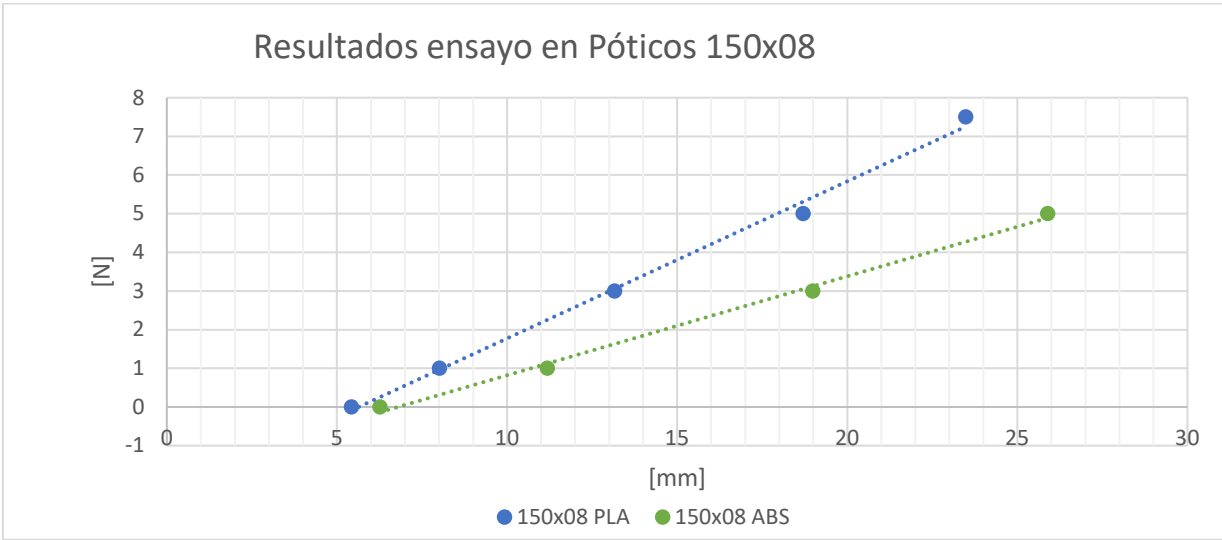


Tabla 19: Comparación de pórticos 150x08

Simulación de pórticos en PLA:

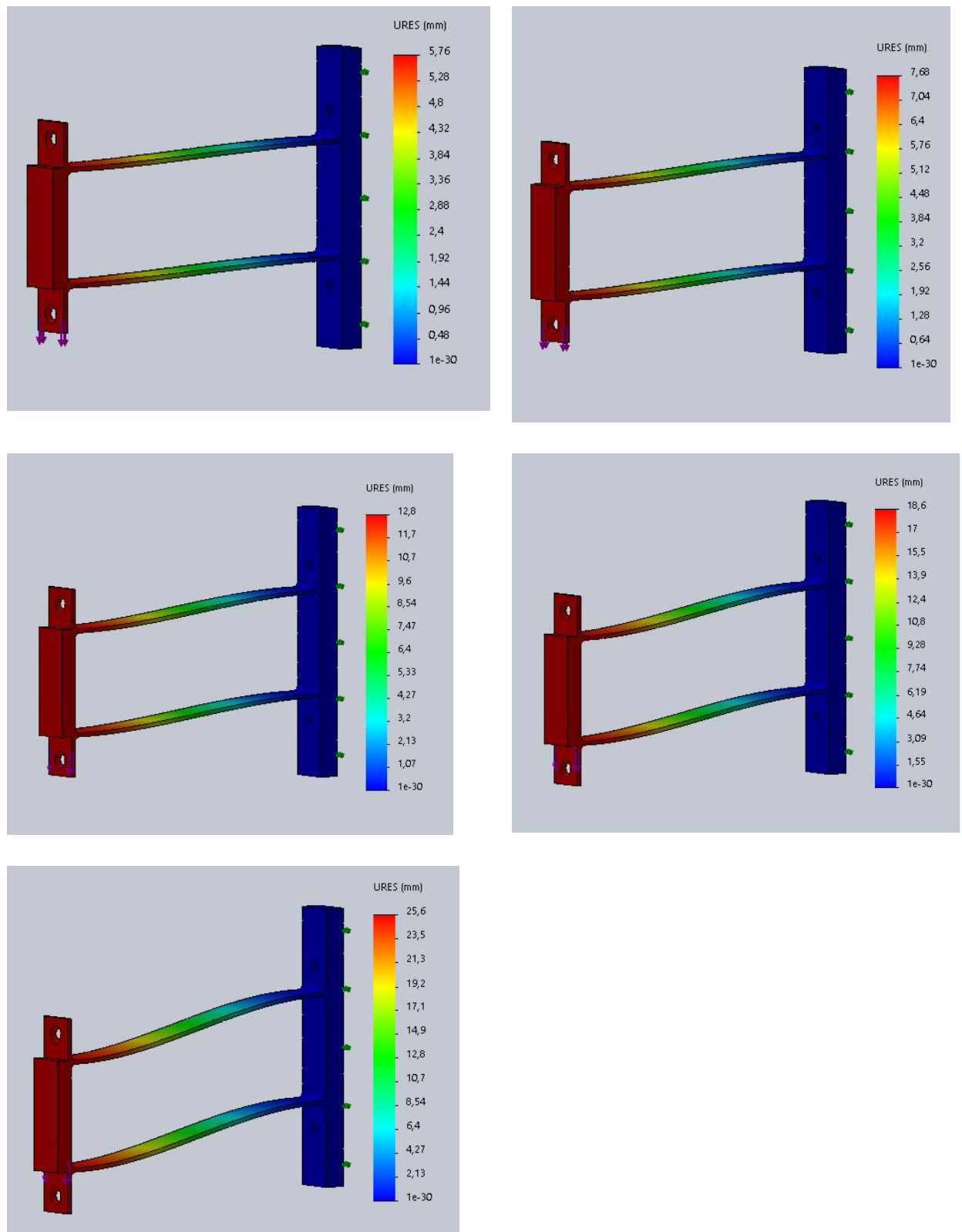


Ilustración 86: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

A continuación las simulaciones en ABS:

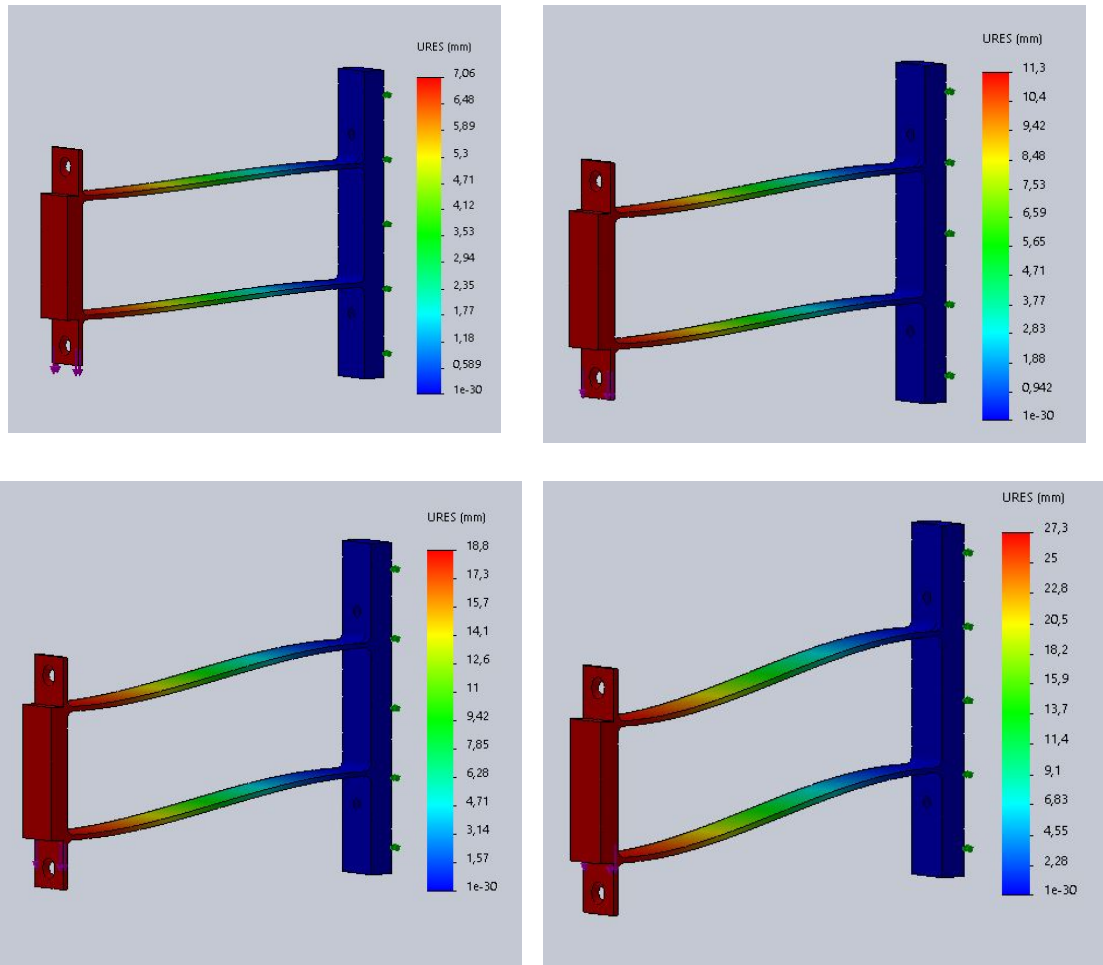


Ilustración 87: Progreso del comportamiento del pórtico (150x08) a diferentes cargas en SolidWorks (ABS)

Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

11.8 Nuevos diseños para mejorar las estructuras.

Se pretende en este punto aportar un enfoque diferente a las estructuras, desde un punto de vista de su mejora mecánica, al garantizar menores desplazamientos para las mismas cargas aplicadas. Para ello se proponen tres modificaciones del pórtico base, únicamente añadiendo elementos sin modificar las características del pórtico principal en cuestión de dimensiones como la longitud la anchura o el espesor de las vigas y columnas. Con esto se pretende llevar el pórtico a un nivel más funcional.

Se diseñan los pórticos de la siguiente manera

Pórtico modificado 1 (diagonal)

Se añade un travesaño desde el nudo inferior izquierdo hasta el nudo superior derecho (diagonalmente).



Ilustración 88: Pórtico modificado con miembro en diagonal

El sistema de ensayos es el mismo que el seguido anteriormente en los pórticos, aplicando las mismas cargas y obteniendo los datos de igual manera.

A continuación se muestran las fotos de los ensayos en sus diferentes puntos de muestreo. La idea es rigidizar la estructura para aportar un mayor rendimiento frente a fuerzas externas.

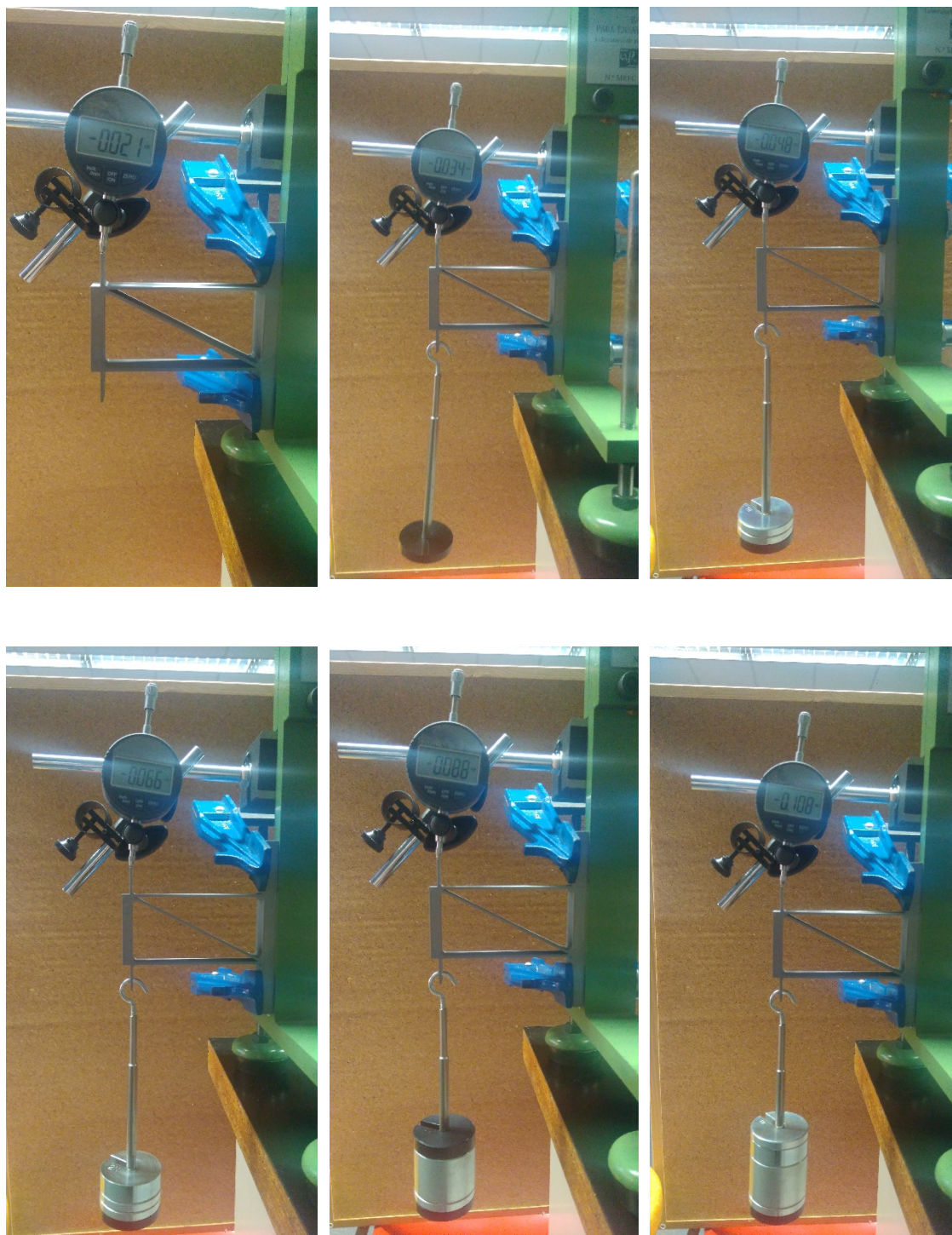


Ilustración 89: Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con diagonal) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)

PLA					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
0,021mm	0,034mm	0,048mm	0,066mm	0,088mm	0,108mm

A simple vista se ve una gran diferencia de deformación frente al pórtico de referencia, a continuación se muestran los datos del ensayo frente a los obtenidos anteriormente en el pórtico 100x08 PLA sin modificar.

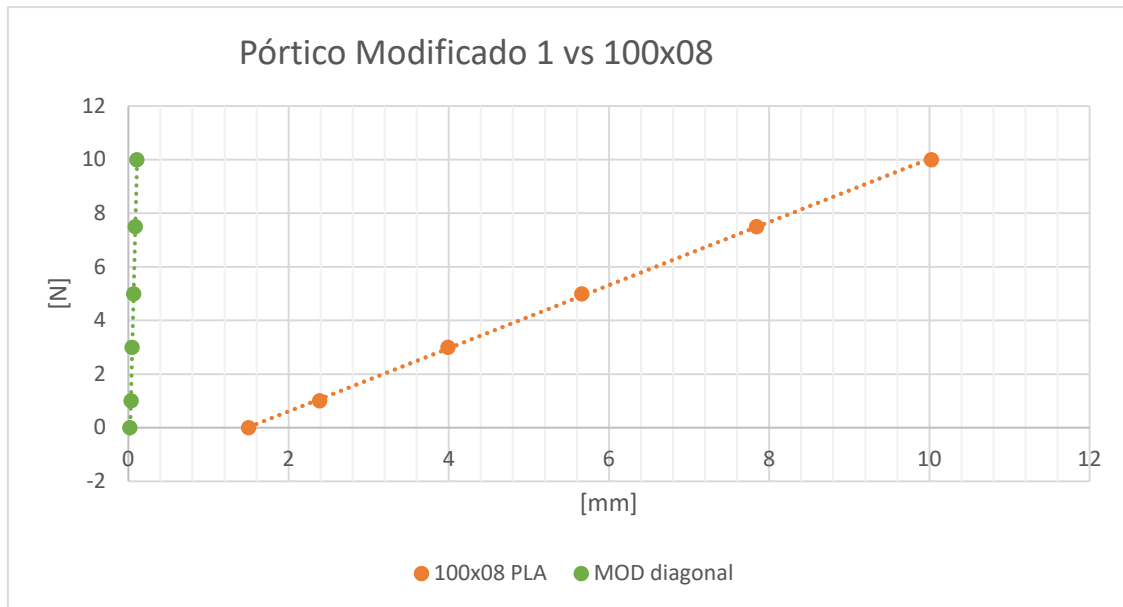


Tabla 20: Comparación pórtico modificado 1 vs 100x08

La diferencia es muy notable, puesto que el pórtico modificado se comporta básicamente como una pieza rígida, frente a las cargas, puesto que no se deforma prácticamente nada.

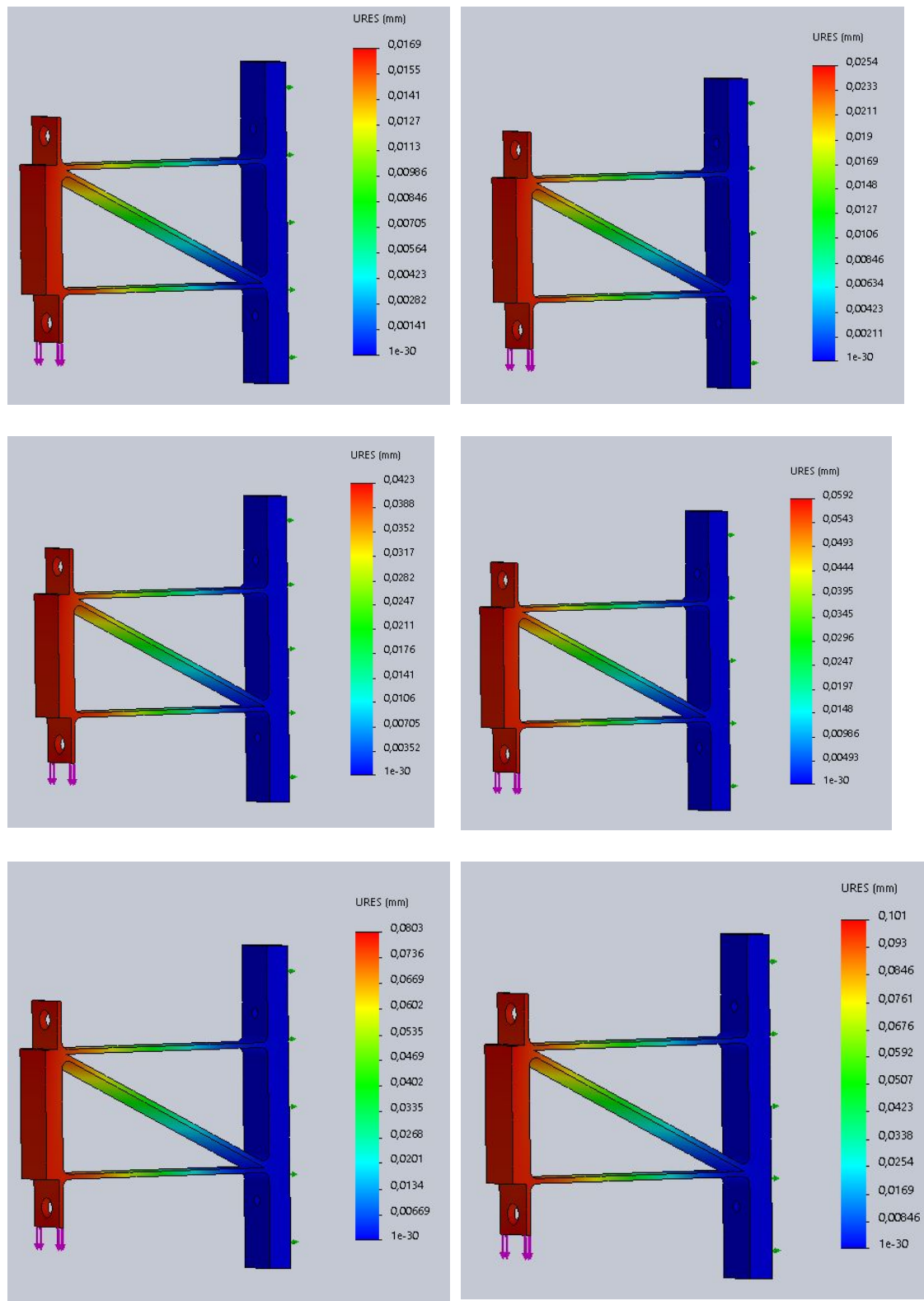


Ilustración 90: Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con diagonal) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

Pórtico modificado 2 (viga intermedia)

En este nuevo diseño se apuesta por generar una división en la cota L, que es la que mayores variaciones produce en el desplazamiento, puesto que el pórtico 50x08 es el que mejor aguanta los esfuerzos, se propone dividir el pórtico 100x08 en dos convirtiéndolo en dos 50x08 consecutivos.

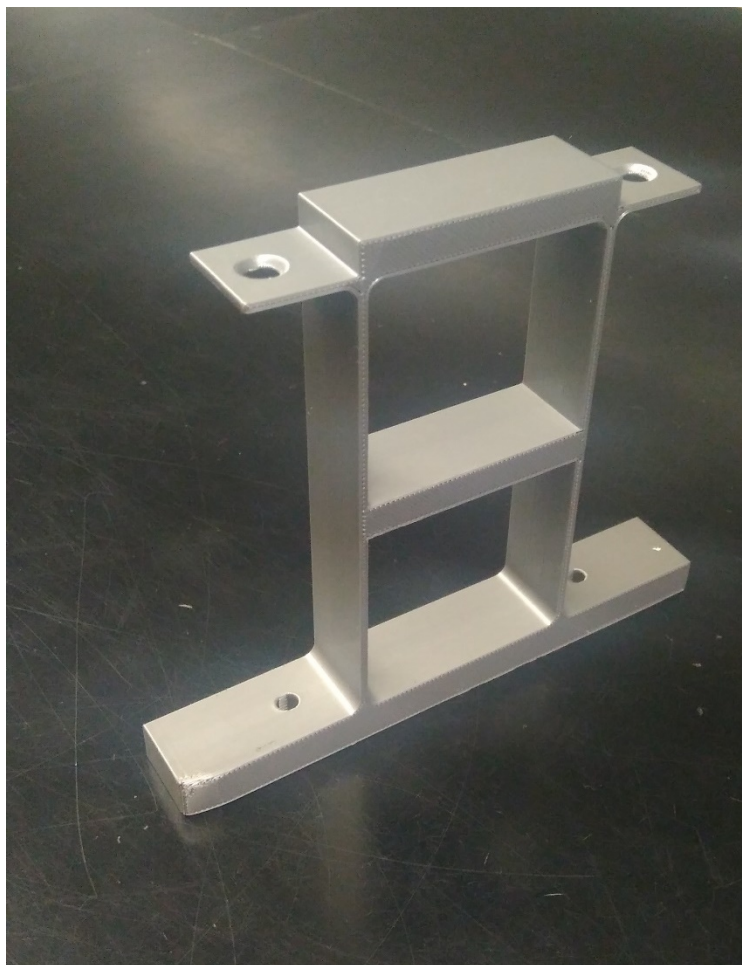


Ilustración 91: Pórtico modificado con viga intermedia

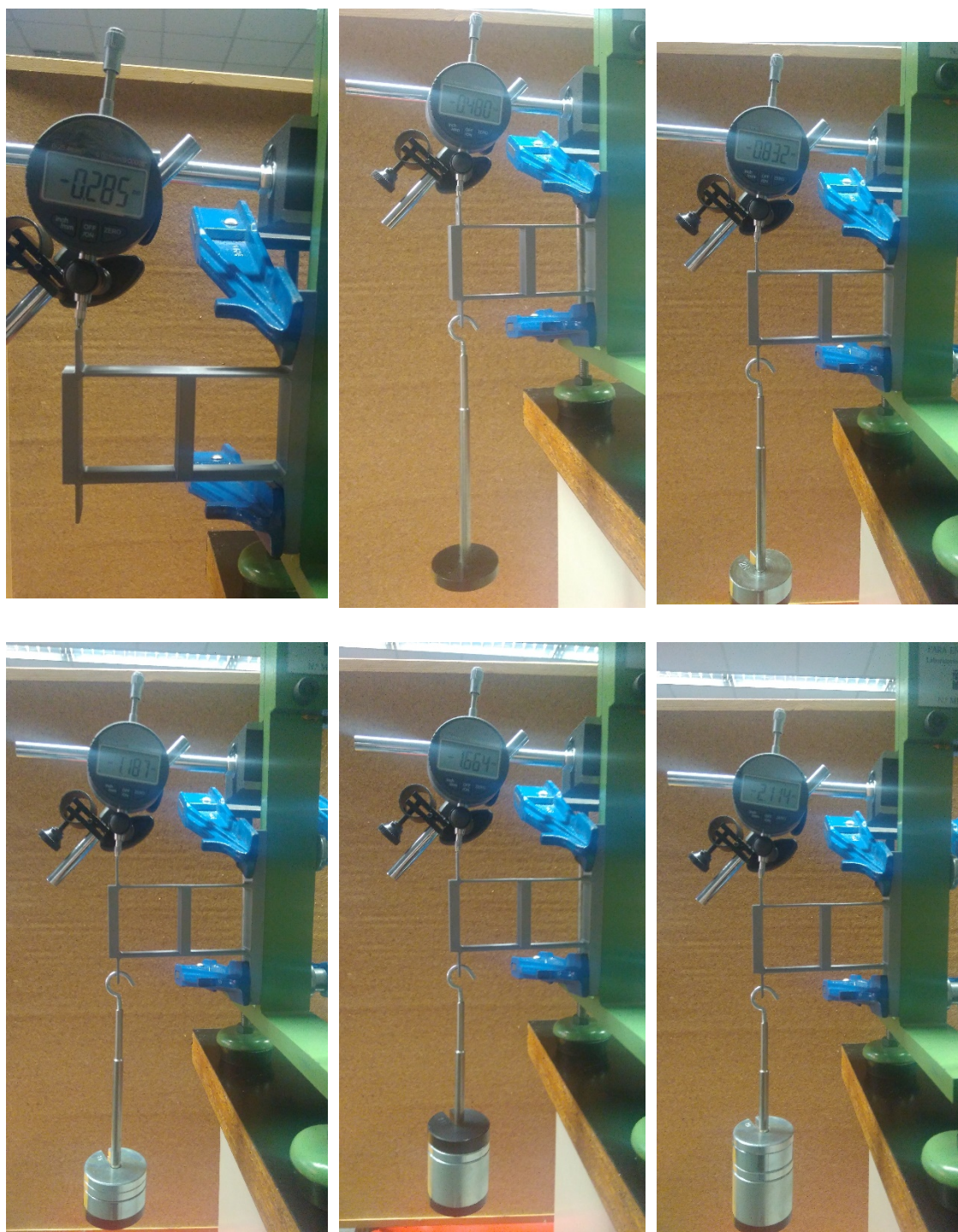


Ilustración 92: : Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con viga intermedia) a diferentes cargas en Laboratorio (PLA)

PLA					
0N	1N	3N	5N	7,5N	10N
0,241mm	0,48mm	0,833mm	1,187mm	1,668mm	2,114mm

El ensayo en SolidWorks refleja los siguientes datos:

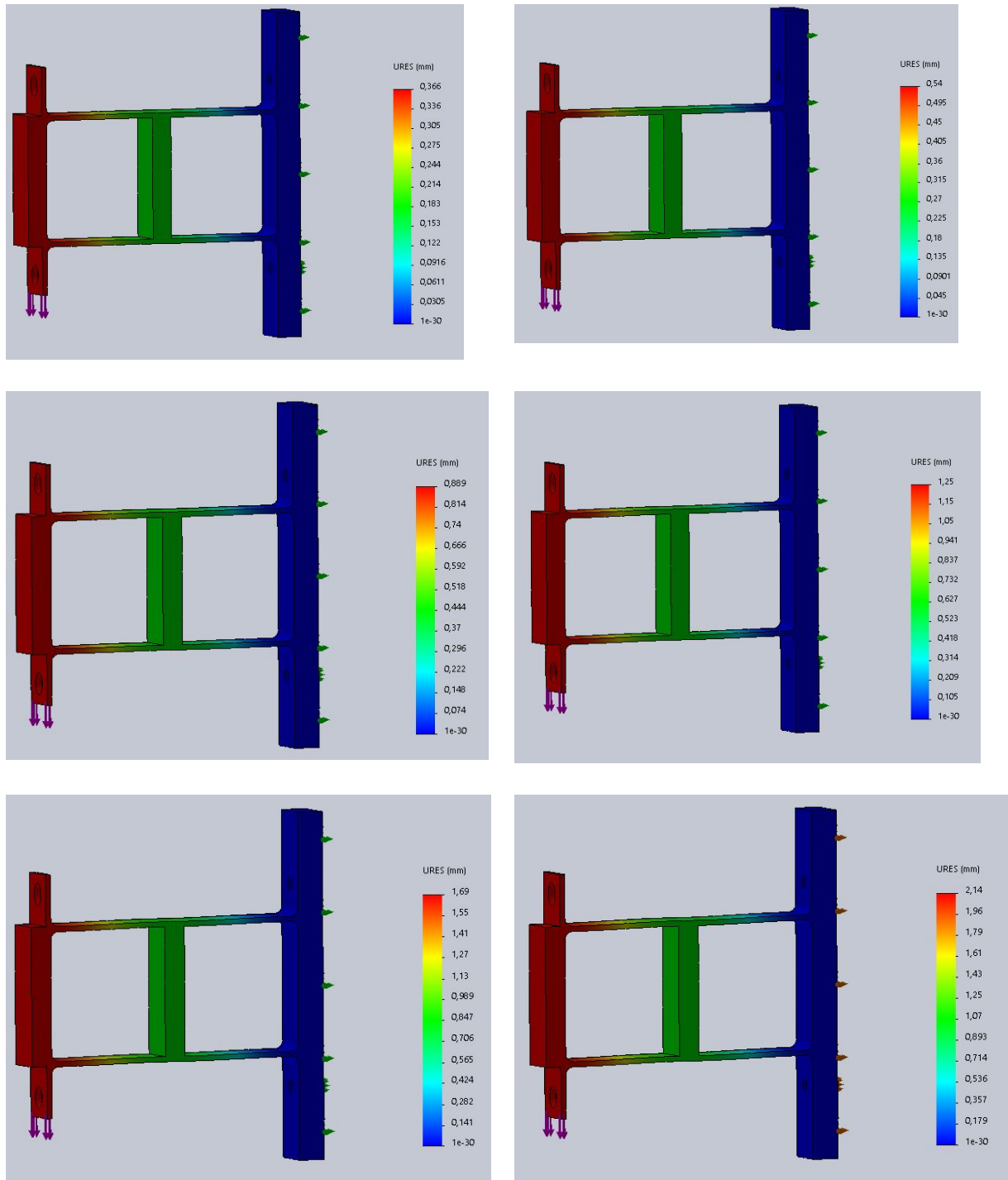


Ilustración 93: Progreso del comportamiento del pórtico (modificado con viga intermedia) a diferentes cargas en SolidWorks (PLA)

Los resultados del ensayo teórico son muy similares en valor a los hallados tras la simulación, la diferencia de desplazamientos es insignificante en todos los casos. El ensayo se concluye de manera satisfactoria.

Conclusiones de la modificación de pórticos

En primer lugar se genera tabla para visualizar los resultados de las dos modificaciones frente al pórtico 100x08 PLA, que se usa de pórtico base en las modificaciones.

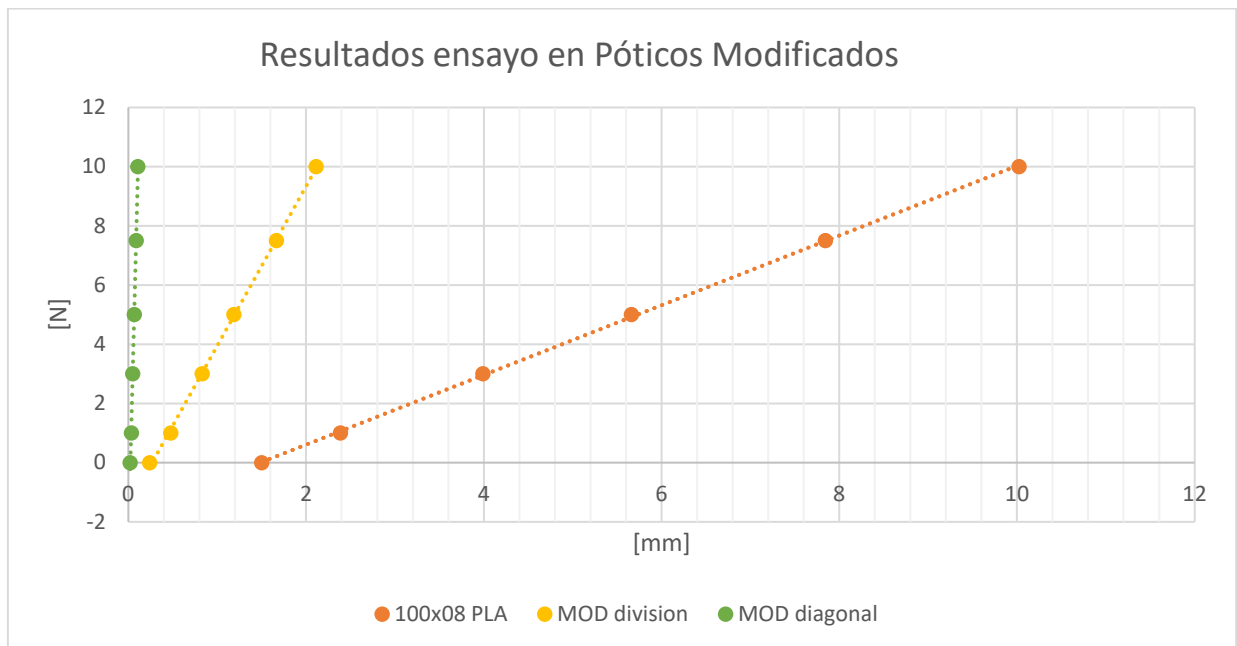


Tabla 21: Comparación entre modelos modificados y original (100x08)

Los resultados son muy claros, ambas modificaciones reducen los desplazamientos.

La primera modificación prácticamente elimina los desplazamientos, es el diseño más efectivo de todos frente a las cargas aplicadas.

12. Estructuras de nudos articulados

Las estructuras a tratar en este apartado serán estructuras impresas en varias piezas, con la idea final de ensamblar las diferentes partes y crear, mediante pasadores, espárragos o tornillos, diversas estructuras articuladas para ser ensayadas posteriormente.

Los diseños de este apartado se descargan de una web de diseños abierta, en la que personas de todo el mundo cuelgan sus estructuras o figuras. Esta es una forma rápida de compartir material didáctico con personas de todo el mundo. Es interesante conocer este tipo de sitios web, puesto que también pueden ser útiles cuando se necesite soporte técnico por el fallo de alguna pieza o la adición de algún complemento a la impresora.

De este modo, se elige la siguiente estructura y se descargan los archivos. Una vez obtenidos, es posible imprimirlos de una sola vez, aunando todos los elementos en la base de la impresora. Esto proporciona una rapidez de proceso muy alta, por lo que en un ámbito educacional, con márgenes de tiempo ajustados, puede ser una solución viable para la rápida impresión de diseños en 3D.

A continuación, se muestra el tipo de estructura que se pretende simular:

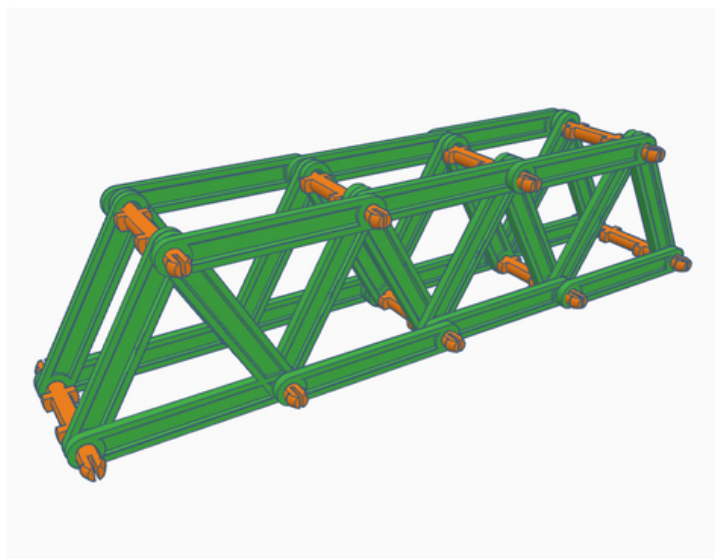


Ilustración 94: Foto de la web Thingiverse

Después de la impresión, que se puede realizar juntando todos los elementos en el mismo archivo G-Code, aunque el elemento será de menor longitud que el mostrado anteriormente.

Se apoya en los extremos y se aplica una carga en el centro como se muestra en las siguientes imágenes:



Ilustración 95: Aplicación de carga en el puente

Los elementos permiten modificar y ampliar la estructura tanto como se quiera. Se muestra en la siguiente imagen una propuesta de ampliación de la estructura:



Ilustración 96: Foto de un diseño modificado de la web Thingiverse

13. Aplicación de la impresión 3D para la visualización de detalles constructivos.

13.1 Uniones de perfiles

Para la comprensión de las uniones entre perfiles desde un punto de vista visual, es decir, de aprender diversas formas en las que se pueden unir dos elementos tipo viga, se generan diseños a escala para representar las uniones más típicas.

Esto aporta un conocimiento extra del mundo industrial, pero también se debe de tener en cuenta para posibles futuros proyectos 3D, en los que puedan ser útiles y decidir cuál es la mejor opción en cada caso según lo visto en este apartado.

Se van a utilizar perfiles tipo IPE, un IPE80 para conformar la pieza que tomará el papel de pilar, y un IPE40 que hará de viga. La unión de viga y pilar se realiza de forma soldada y atornillada, para ver sus diferencias tanto en diseño como en funcionalidad. Se espera que la unión soldada sea 100% rígida, y que la unión atornillada pueda dejar ciertas holguras.

En primer lugar, se muestra la pieza soldada. Para la realización de esta pieza en 3D, es importante añadir material de soporte para poder imprimir el ala del perfil IPE40 puesto que este queda en voladizo a la hora de ser impreso.

Una vez que acaba la impresión, se retira el material de soporte, que sirve únicamente para hacer posible la impresión de las zonas en voladizo. El resultado es el siguiente:

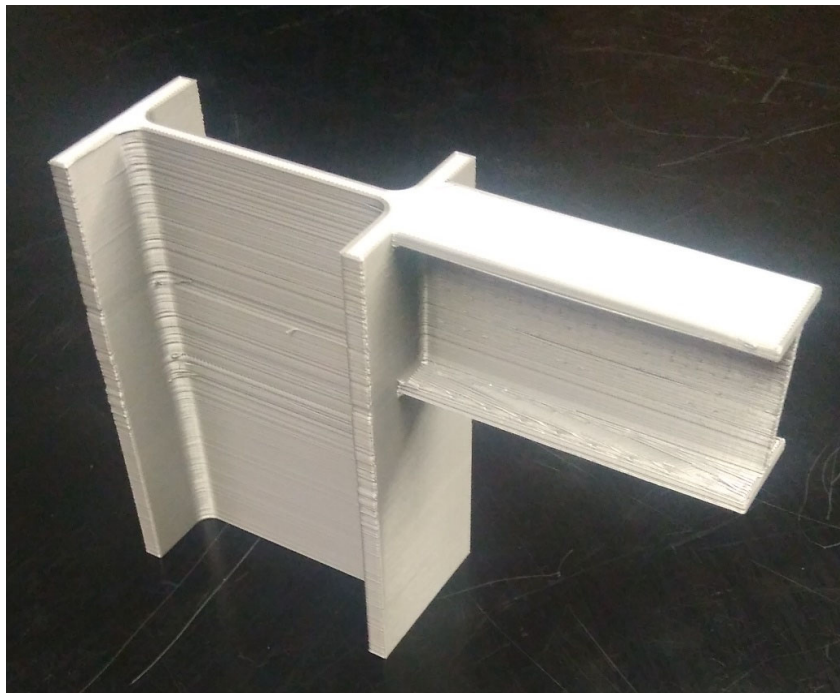


Ilustración 97: Pieza de uniones soldadas impresa en PLA

Y por otra parte, imprimiendo ambos perfiles por separado, y unas pletinas para poder atornillar las piezas, se genera la pieza que se muestra a continuación:

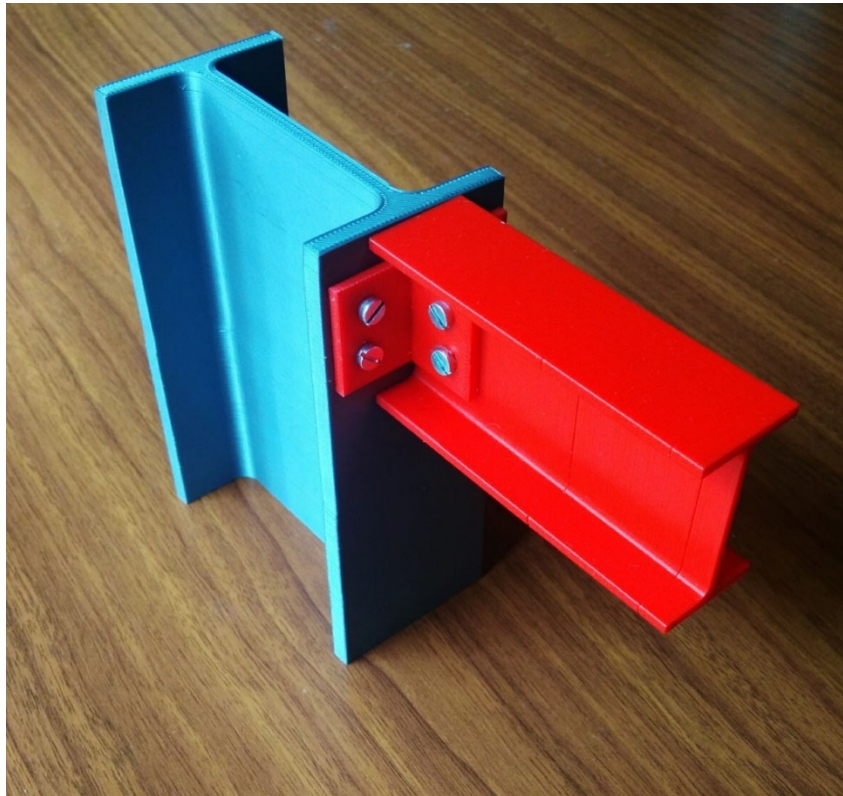
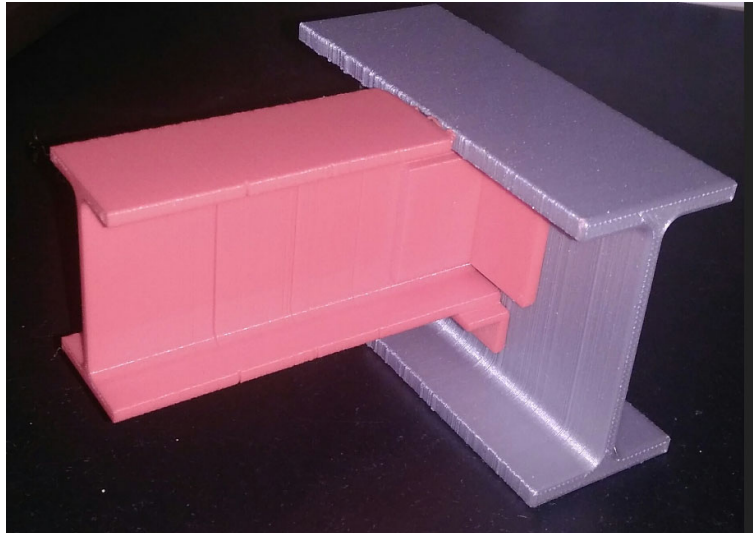


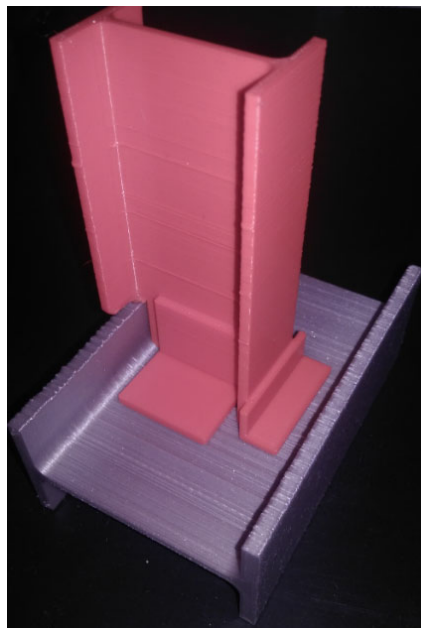
Ilustración 98: Pieza de uniones atornilladas impresas en PLA

Los tornillos son de métrica 3, y se atornillan con un taladro previo a las piezas.

Un nuevo diseño se genera para la unión de un perfil a una viga, en este caso acoplado de una forma más precisa, al realizar un rebaje del perfil de color rojo, para que se adapte mejor a la situación de anclaje. En la siguiente imagen se muestra la pieza impresa en 3D.



Se gira la pieza para poder observar más detalles:



13.2 Modelo de viga armada

En este último caso se va a utilizar la impresora ULTIMAKER puesto que, para diferenciar el hormigón de la armadura, se quiere imprimir en dos colores cada uno de los elementos.

Para ello el proceso de diseño que se sigue es homólogo a cualquier otro que se haya llevado a cabo en SolidWorks. A continuación, se muestra el diseño 3D que se idea para una clara visualización.

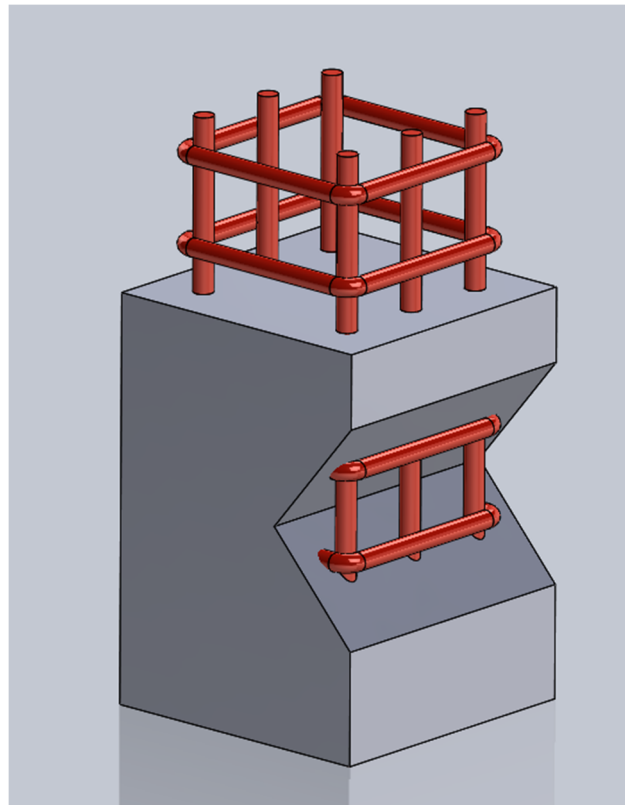


Ilustración 99: Diseño de viga armada

Lo importante en este caso, es exportar por separado ambas piezas al formato STL, y no el conjunto que se muestra en la imagen superior. Esto se debe a que a la hora de tratar los archivos en el programa CURA, este exige los archivos por separado, para asignar a cada pieza un extrusor distinto, que serán cargados obviamente con colores distintos.

El proceso a seguir en Cura es el siguiente:

Se abre la aplicación CURA 4.0 y se añaden los archivos STL por separado. Una vez hecho esto aparecerán en pantalla ambos elementos de la siguiente manera:

Es interesante anotar, que cada extrusor puede llevar una configuración independiente al otro y esto facilita la optimización del material y aporta al usuario multitud de posibilidades.

Una vez asignados los extrusores 1 y 2, click derecho y pulsar la pestaña MERGE para que ambas piezas encajen entre sí. Se exporta en versión G-Code y ya está todo listo para su impresión.

El progreso de impresión se muestra en la siguiente secuencia de imágenes:

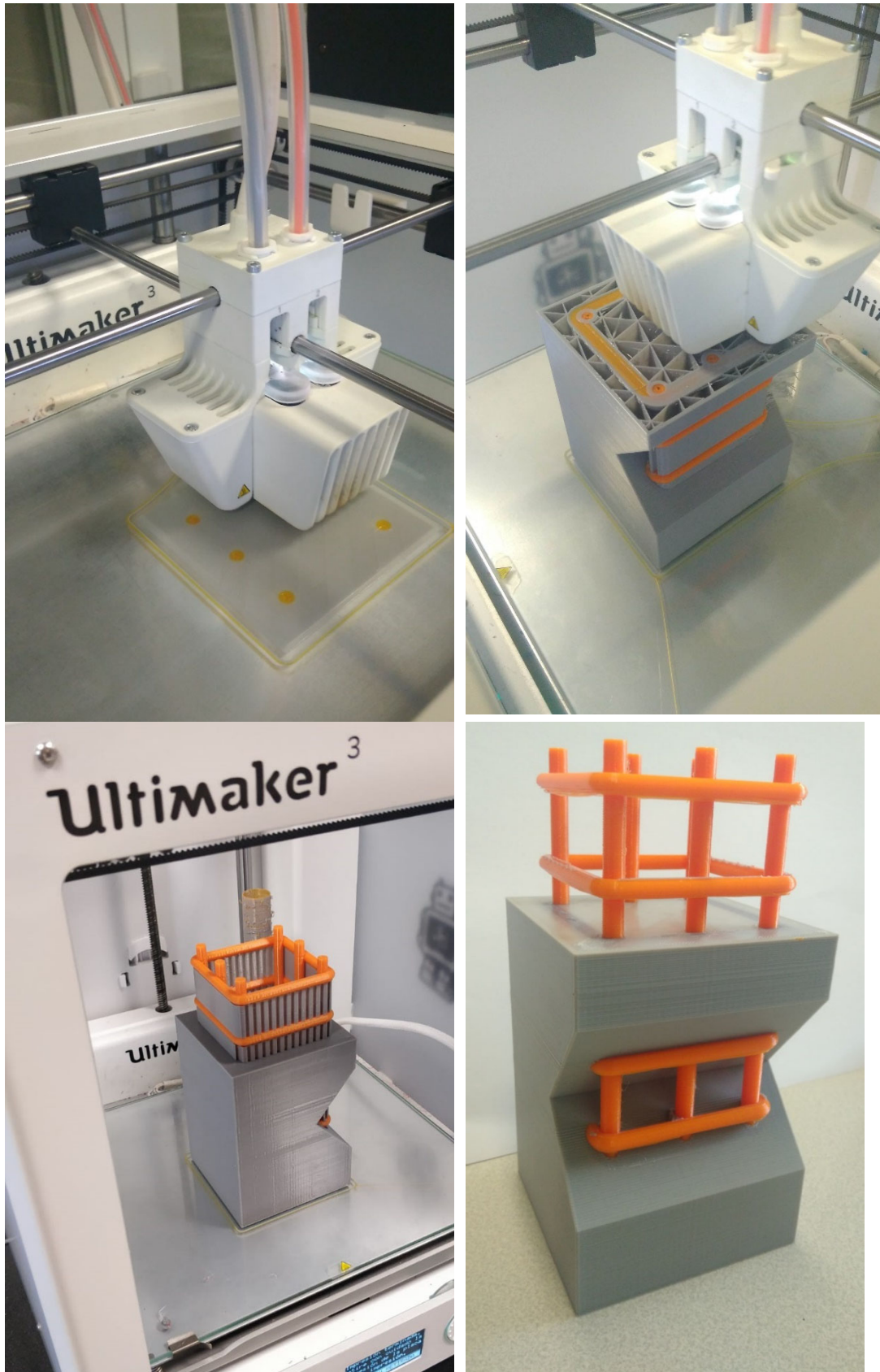


Ilustración 100: Proceso de impresión de la viga armada (tiempo total: 19 horas)

Como se aprecia en las fotos, se genera un corte virtual, únicamente con el propósito de que la persona que vea la pieza, asuma que el armado (parte naranja) transcurre por toda la viga de hormigón de forma continua, con idea de proporcionar un refuerzo y mejorar sus prestaciones.

También es visible el material de apoyo necesario que queda de manera residual, utilizado en este caso para la armadura (zona naranja en voladizo). Es posible retirar este material de soporte simplemente con la mano o si fuese necesario con alguna herramienta de corte. Una vez retirado el material, la pieza queda exactamente como se desea y se había diseñado en SolidWorks.

14. Conclusiones finales del proyecto

Una vez concluidos todos los ensayos y todos los puntos tratados en este proyecto, se describen las siguientes conclusiones con vistas al trabajo realizado:

La impresión 3D es una tecnología que aporta muchísimas posibilidades al mundo de la educación, además, al ser un campo de conocimiento abierto, es muy sencillo encontrar información útil, archivos de piezas o proyectos de terceros e incluso software de acceso libre para llevar a cabo las impresiones.

Los resultados obtenidos entre los ensayos del laboratorio son muy similares, esto conlleva a que las impresiones han sido realizadas con las correctas configuraciones y que se han tomado las medidas correctas en el laboratorio en el momento de los ensayos de desplazamientos reales.

La compensación del muelle del calibre ha sido vital en las simulaciones de desplazamientos para acabar hallando valores tan similares. El ensayo sería más fácil sustituyendo este calibre de reloj por un medidor laser de desplazamientos, ya que esa fuerza del muelle desaparecería.

En el trascurso de las impresiones, se ha determinado el PLA como el mejor material para imprimir, puesto que no es necesario cubrir la impresora como en el ABS (lo que ha acarreado algún problema de atasco por fallo del ventilador). Tanto por facilidad de impresión como por cualidades, ya que el PLA en todos los ensayos ha obtenido mejores resultados que su mismo diseño en ABS.

El acabado del PLA es mejor que el ABS, puesto que este último puede deformarse por las corrientes de aire.

15. Bibliografía

General en la elaboración del documento:

Artículos ELSEVIER:

- Enhancing the teaching of elastic buckling using additive manufacturing. Autor: Lawrence N. Virgin (School of Engineering, Duke University, Durham, NC 27708, USA)
- Enhancing the teaching of linear structural analysis using additivemanufacturing. Autor: Lawrence Virgin (School of Engineering, Duke University, Durham, NC 27708, USA) (Accepted 17 July 2017)
- Enhancing the teaching of seismic isolation using additive manufacturing. Autor: S.J. Calhoun, P.S. Harvey Jr. (School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA)
- Enhancing the teaching of structural dynamics using additivemanufacturing. Autor: Lawrence Virgin (School of Engineering, Duke University, Durham, NC 27708, USA). Accepted 25 September 2017

3. Antecedentes:

- Sitio web información :<https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>

4 Aplicación de la impresión 3D:

4.1 Aplicaciones en ocio:

- Figura de la prótesis e información: <https://www.24horas.cl/tendencias/salud-bienestar/padre-fabrica-protesis-para-su-hijo-con-una-impresora-3d-948928>
- Imagen de 4 Objetos: <https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/181-original-prusa-i3-mk3-3d-printer.html#>
- Imagen de la impresora creada por el programa RepRap: https://www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars

4.2 Aplicaciones en Educación:

- <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-en-la-educacion-290820182/>
- Ilustración 4: <http://it3dprinters.com/>

4.3 Aplicaciones en Ingeniería

- Metal: TechDay Conferencia: <https://www.youtube.com/watch?v=gCcQvWaSLTs>
- Informe Wohlers 2017 : <http://wohlersassociates.com/press74.html>

4.4 Aplicación en arquitectura:

- <http://www.sergioperezarq.com/las-impresoras-3d-en-la-arquitectura/>
- <https://sicnova3d.com/blog/el-impacto-de-la-impresion-3d-en-la-arquitectura/>
- <https://www.elmundo.es/madrid/2016/12/20/5857bf4d268e3ef2778b4761.html>

4.5 Aplicaciones en Medicina

- Corazón impreso en 3D: <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/este-primer-corazon-impreso-3d-celulas-propio-paciente>
- <https://www.elsevier.com/es-es/connect/ciencia/bioprinting-el-mundo-del-3d-en-la-medicina>
- <https://www.3dnatives.com/es/aplicaciones-por-sector/>

4.6 Aplicaciones en el sector alimenticio:

- Ilustración 12 e información cocina 3D: <https://www.3dnatives.com/es/comida-impresa-en-3d-cocina-3d-210520182/>

6. Materiales y programas informáticos utilizados:

- Tienda PRUSA: <https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/181-original-prusa-i3-mk3-3d-printer.html#>

7. bases teóricas para la realización del proyecto

- Apuntes de la asignatura “Elasticidad y Resistencia de materiales”
- Bases para los ensayos de tracción:
<https://www.monografias.com/trabajos72/diagrama-esfuerzo-deformacion/diagrama-esfuerzo-deformacion2.shtml>

9. Bases técnicas para la realización del proyecto:

- Libro: Impresión 3D (Sergio Gómez González) Editorial: Marcombo
- TFG: Proyecto de diseño de piezas modeladas con una impresora 3D para la realización de prácticas de laboratorio de la asignatura de resistencia de materiales y teoría de estructuras. Autor (Xavier Rodríguez Campillo). Universidad (UPC)

12. Estructuras de nudos articulados:

- <https://www.thingiverse.com/thing:2451811>

PLIEGO DE CONDICIONES

Trabajo Fin de Grado

Sergio Calvo Simón

PLIEGO DE CONDICIONES

En este documento se trata de reflejar las condiciones generales del trabajo, la descripción y características de los materiales a utilizar, los planos constructivos y los riesgos a tener en cuenta en el trabajo.

El presente proyecto, al tratarse de un trabajo de carácter divulgativo exclusivamente, no se tratarán condiciones contractuales cliente-empresa. Por tanto no se genera un Pliego de Condiciones convencional. Su objetivo principal es dar al lector del documento el conocimiento adquirido durante este proyecto para que pueda generar una idea similar, con resultados satisfactorios y sin desperdiciar tiempo y material por cometer errores de diferentes tipos en el proceso.

CONDICIONES GENERALES DE TRABAJO

Para comenzar el trabajo es indispensable tener una impresora 3D, filamento, y un programa de simulación 3D como elementos más específicos. Por tanto se ha de conocer el material del que se dispone puesto que dependiendo de él, se aplicarán unas u otras configuraciones.

El espacio de trabajo debe ser adecuado con las siguientes características:

- Tipo de sala para ensayos
- Temperatura y humedad
- Instalación eléctrica
- Ventilación
- Equipos de seguridad personal

Se requiere un espacio de trabajo amplio, con mesas de trabajo estables y herramientas adecuadas.

Las condiciones de temperatura y humedad deben de ser adecuadas para el usuario y para el correcto funcionamiento de la maquinaria.

La instalación eléctrica es otro aspecto muy importante a cuidar, ya que las impresoras 3D necesitan en este proyecto bastante tiempo de impresión y un corte del suministro eléctrico resultaría un fallo crítico en el proceso e incluso los equipos pueden sufrir daños.

La habitación de impresión debe estar adecuadamente ventilada, ya que se pueden generar gases en la impresión y olores, pero a su vez evitando las corrientes de aire.

Para las impresiones 3D no es necesario equipamiento del estilo de un taller convencional (botas, gafas, guantes...) tan solo con ropa cómoda y sentido común es suficiente para no tener ningún problema. De todas formas el laboratorio o taller es conveniente que tenga un botiquín de emergencia.

USO CORRECTO DE LOS MATERIALES

Es de vital importancia tener conocimientos sobre los materiales que se van a tener a disposición para el proyecto, sea igual al presente o de similares características para evitar errores al tratarlos.

En primer lugar, se deben de conocer las extensiones en los archivos que se manejan con los diferentes softwares. En orden de aparición los tipos de archivos son los siguientes:

- Archivo DWG o CAD
- Archivo STL
- Archivo G-code

El uso de Autocad o Solidworks como software referencia del ámbito educativo, genera archivos en multitud de extensiones y se deben conocer cuales interesan para este proyecto y para la impresión 3D en general. Los archivos 3D diseñados en un programa tipo CAD son en defecto archivos con extensión DWG. Es interesante guardar estos archivos para futuras modificaciones.

Los archivos se exportan en formato STL desde el programa CAD, en guardar como... y seleccionando dicha extensión antes de pulsar el botón guardar.

Una vez que se obtienen los archivos STL, con diseños definitivos, se han de abrir con un programa especializado en la impresión 3D, y para esta elección en uno u otro, ya que existen multitud de programas en internet, se recomiendan los 2 programas reflejados en la memoria, CURA y SLIC3R.

En principio con cualquiera de los dos programas se puede imprimir sea cual sea la impresora que se tenga disponible, pero lo más adecuado para no tener ningún problema y facilitar la configuración es:

- SLIC3R para impresoras PRUSA
- CURA para impresoras ULTIMAKER (impresión a dos colores)

A la hora de imprimir la pieza hay que tener cuidado con las zonas calientes, la base y el extrusor, y no retirarlas hasta que el proceso haya concluido completamente.

Es conveniente antes de cada cambio de filamento, cortarlo en 45º antes de introducirlo en el extrusor.

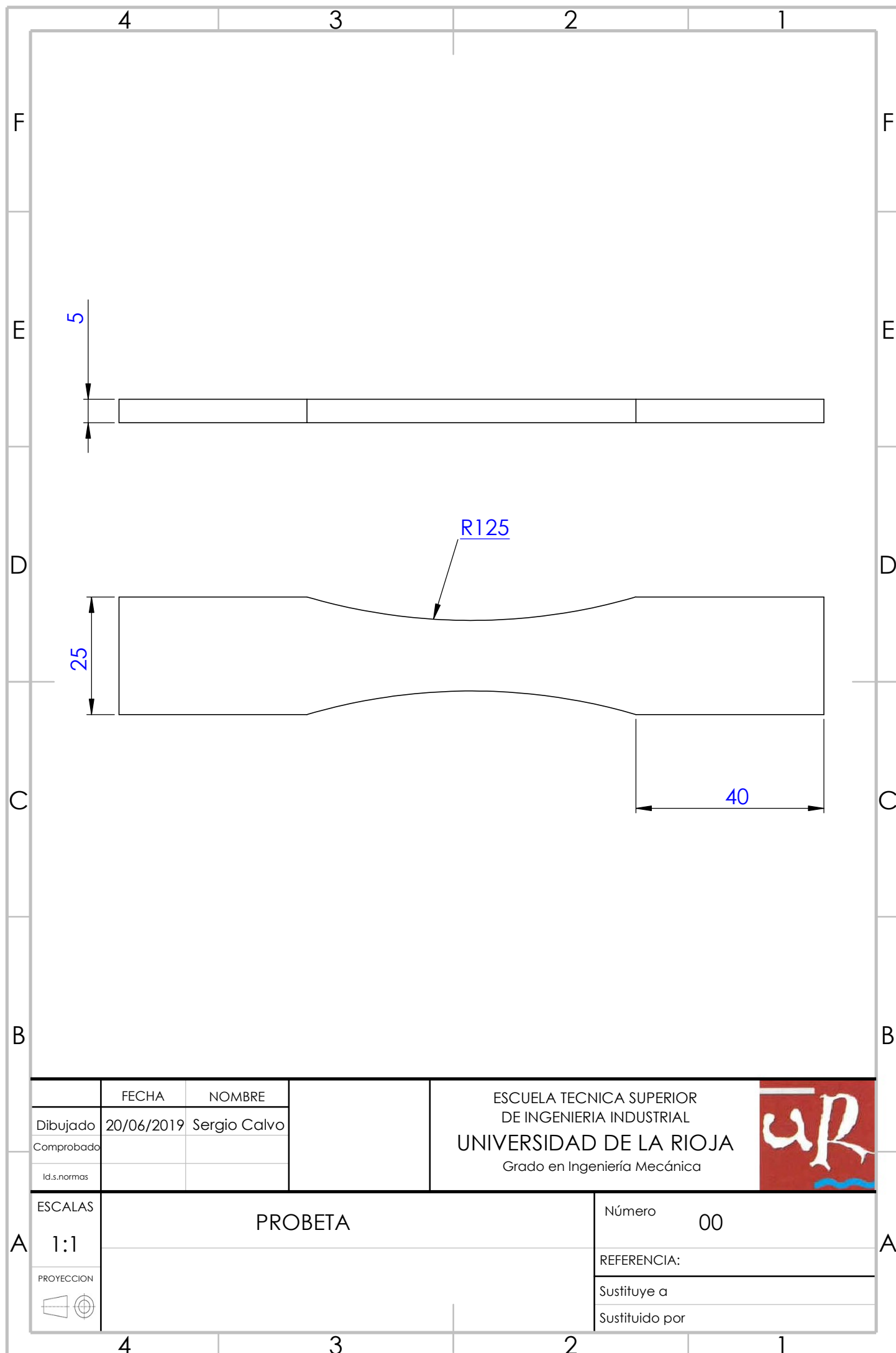
Se recomienda rociar laca en la base justo antes de comenzar las impresiones.

Con todas estas recomendaciones, y siguiendo las instrucciones del fabricante, se conseguirán resultados muy buenos de impresión, sin riesgo de dañar la máquina o de tener un percance el propio usuario por uso indebido.

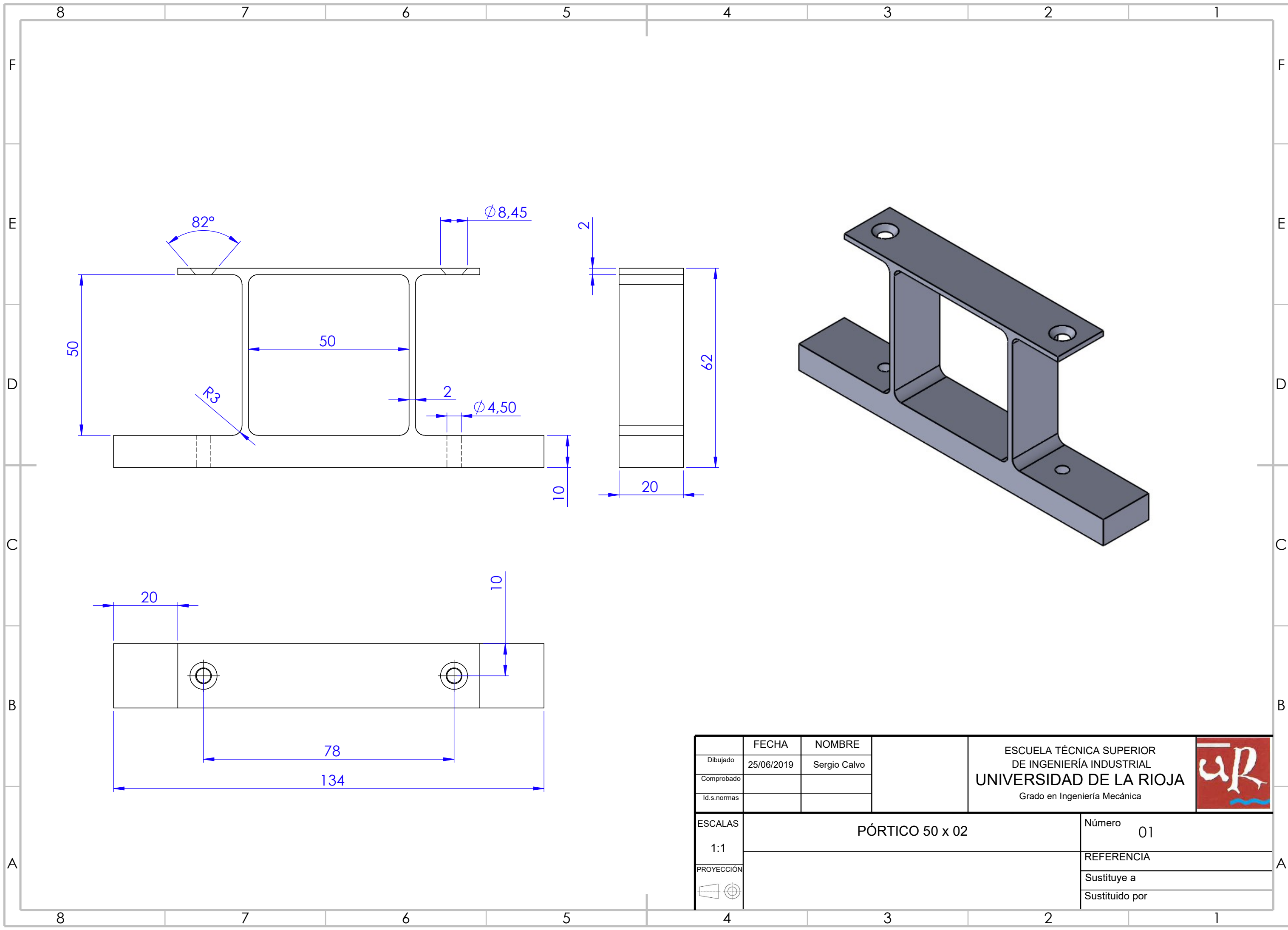
PLANOS

Trabajo Fin de Grado

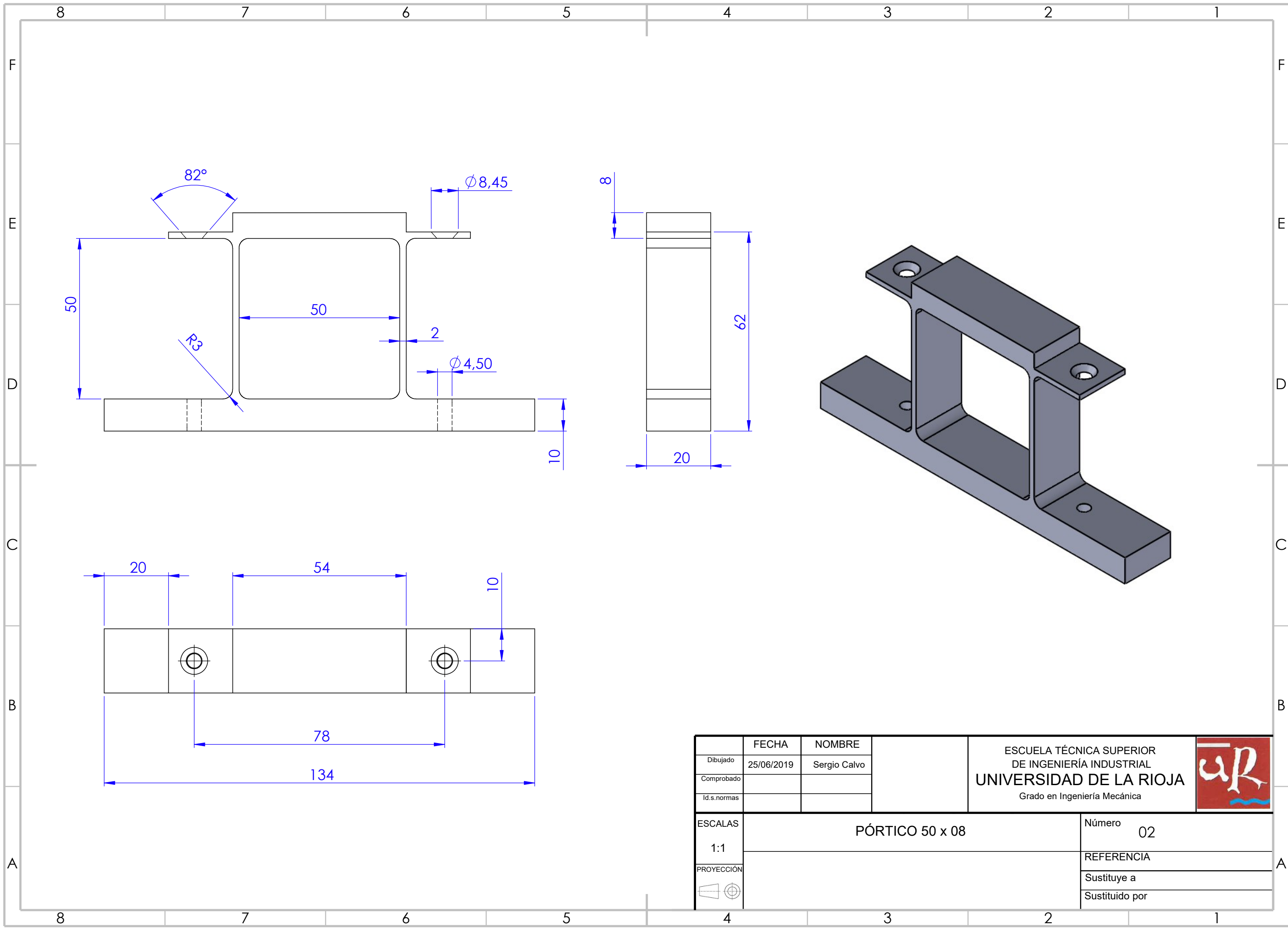
Sergio Calvo Simón




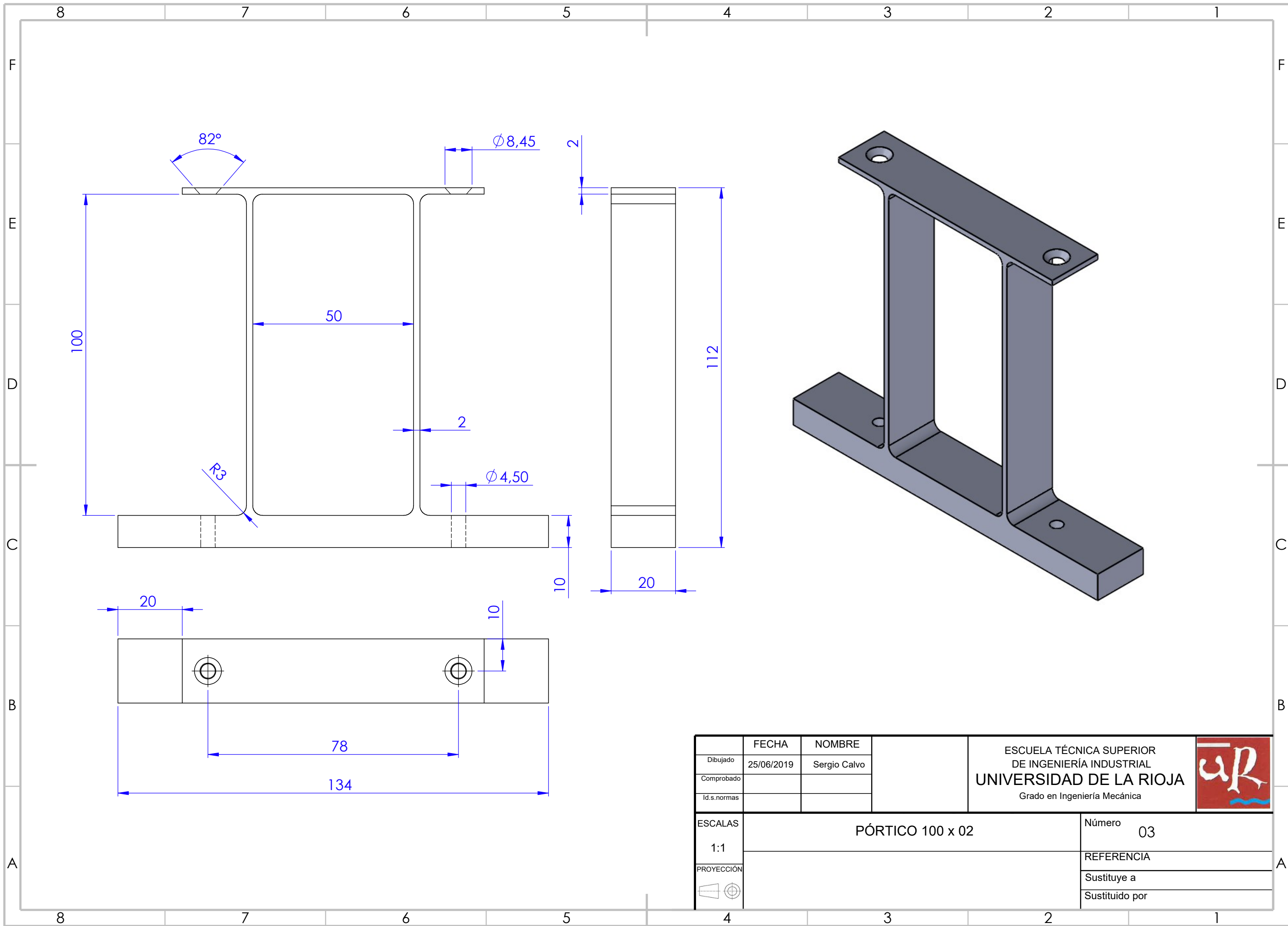
	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	20/06/2019	Sergio Calvo			
Comprobado					
Id.s.normas					
ESCALAS	PROBETA			Número	00
1:1					
PROYECCION				REFERENCIA:	
				Sustituye a	
				Sustituido por	




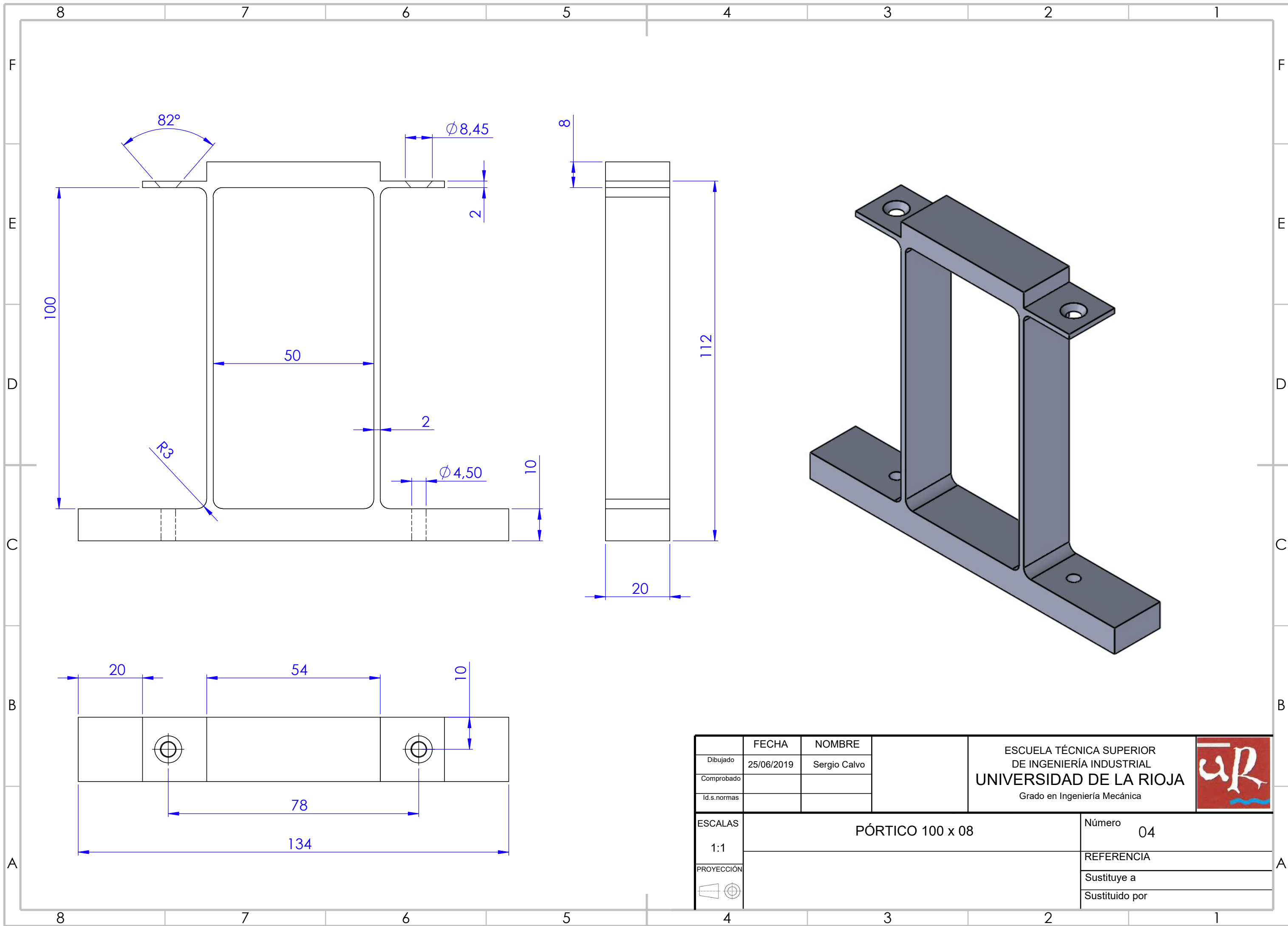
	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	25/06/2019	Sergio Calvo			
Comprobado					
Id.s.normas					
ESCALAS	PÓRTICO 50 x 02			Número	01
1:1				REFERENCIA	
PROYECCIÓN				Sustituye a	
				Sustituido por	

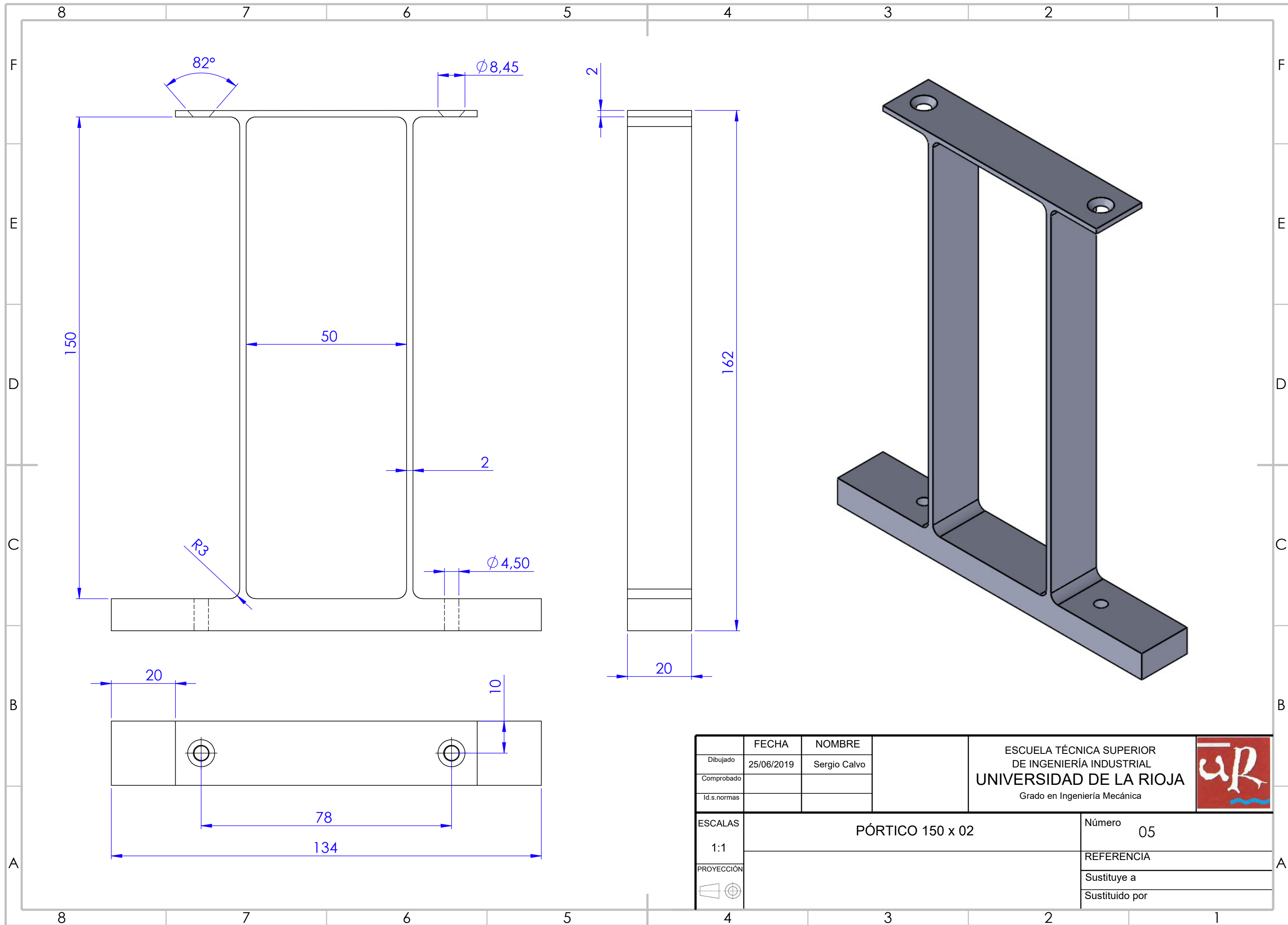


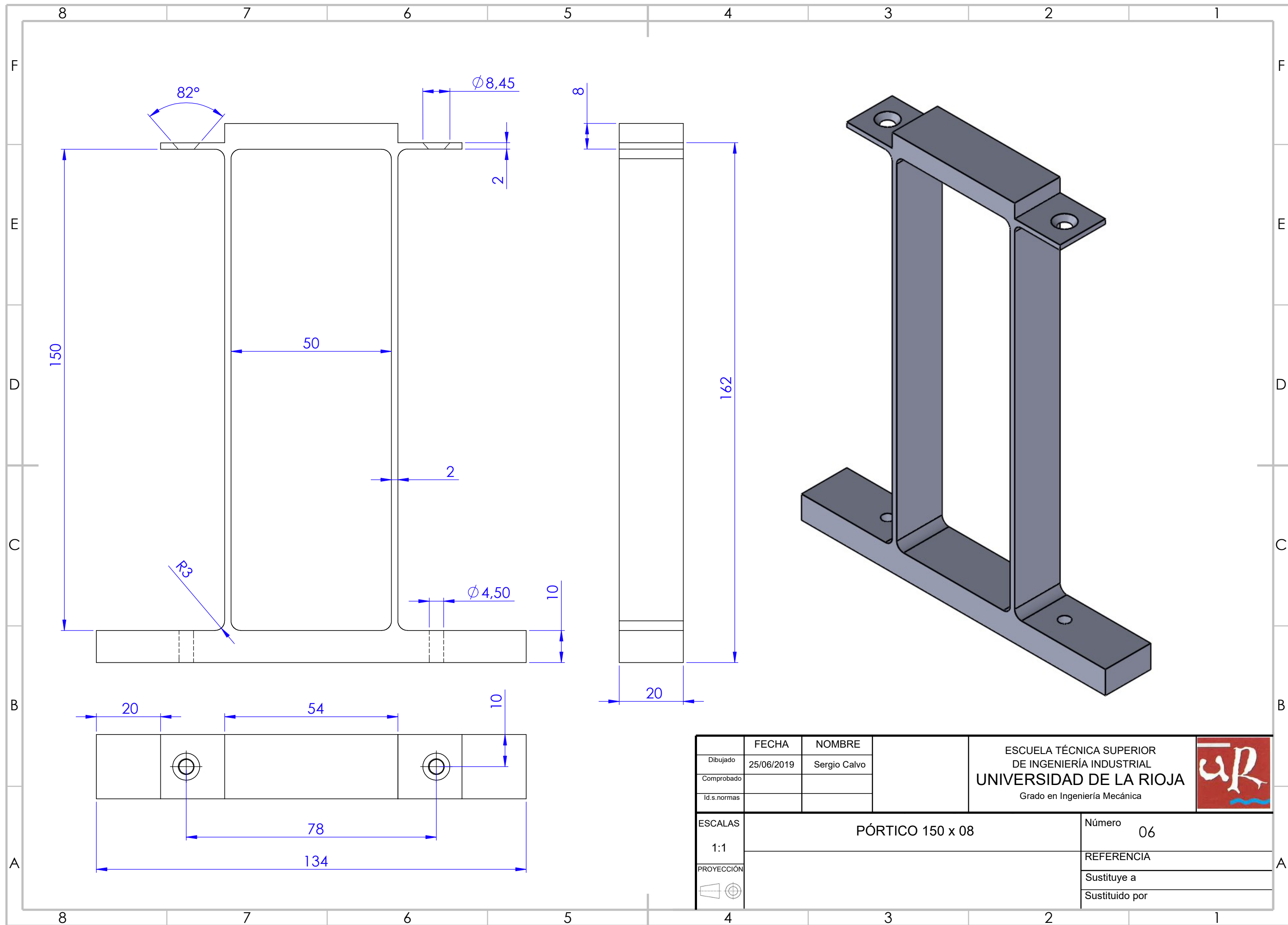
	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	25/06/2019	Sergio Calvo			
Comprobado					
Id.s.normas					
ESCALAS	PÓRTICO 50 x 08			Número	02
1:1				REFERENCIA	
PROYECCIÓN				Sustituye a	
				Sustituido por	

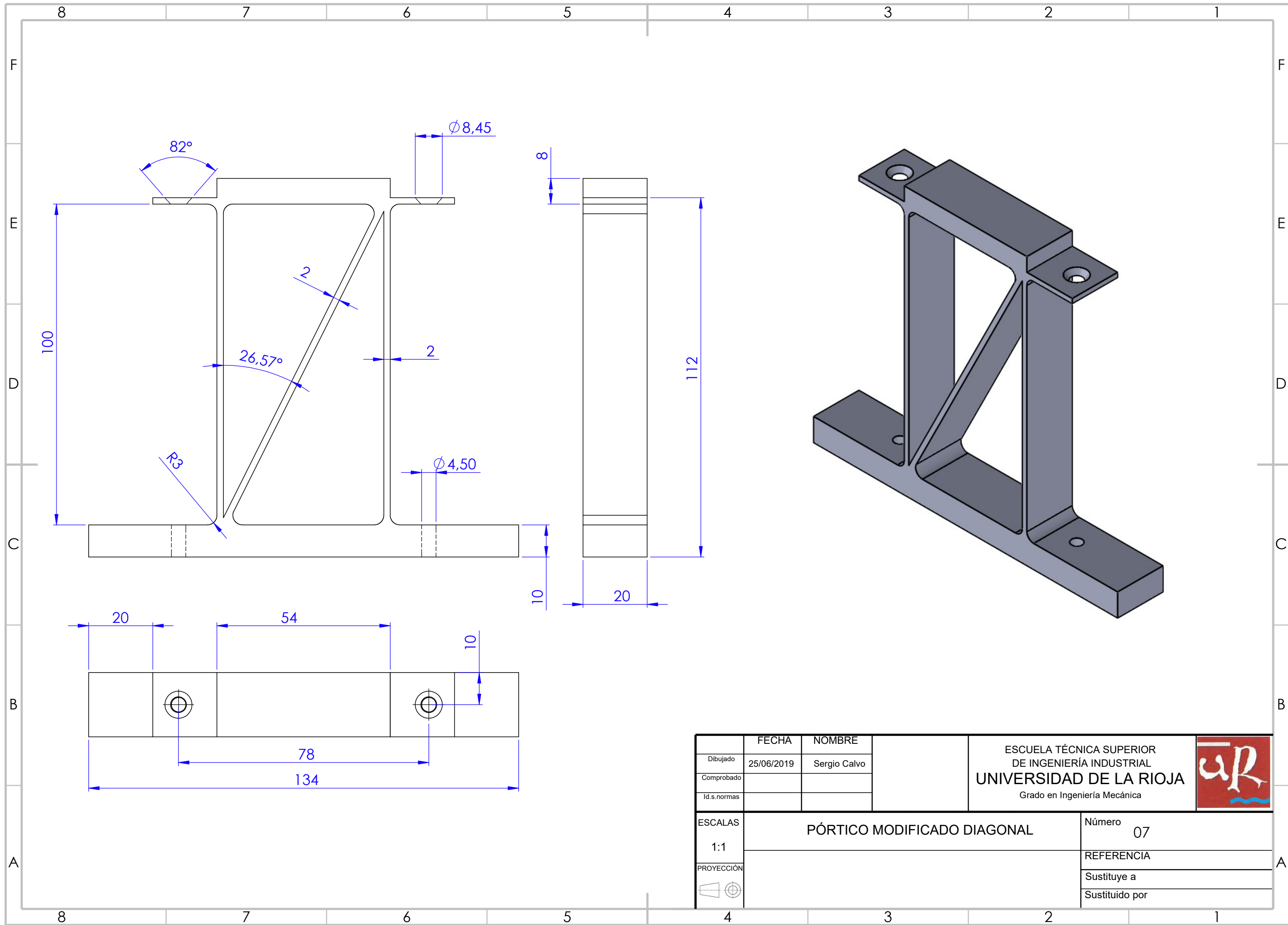


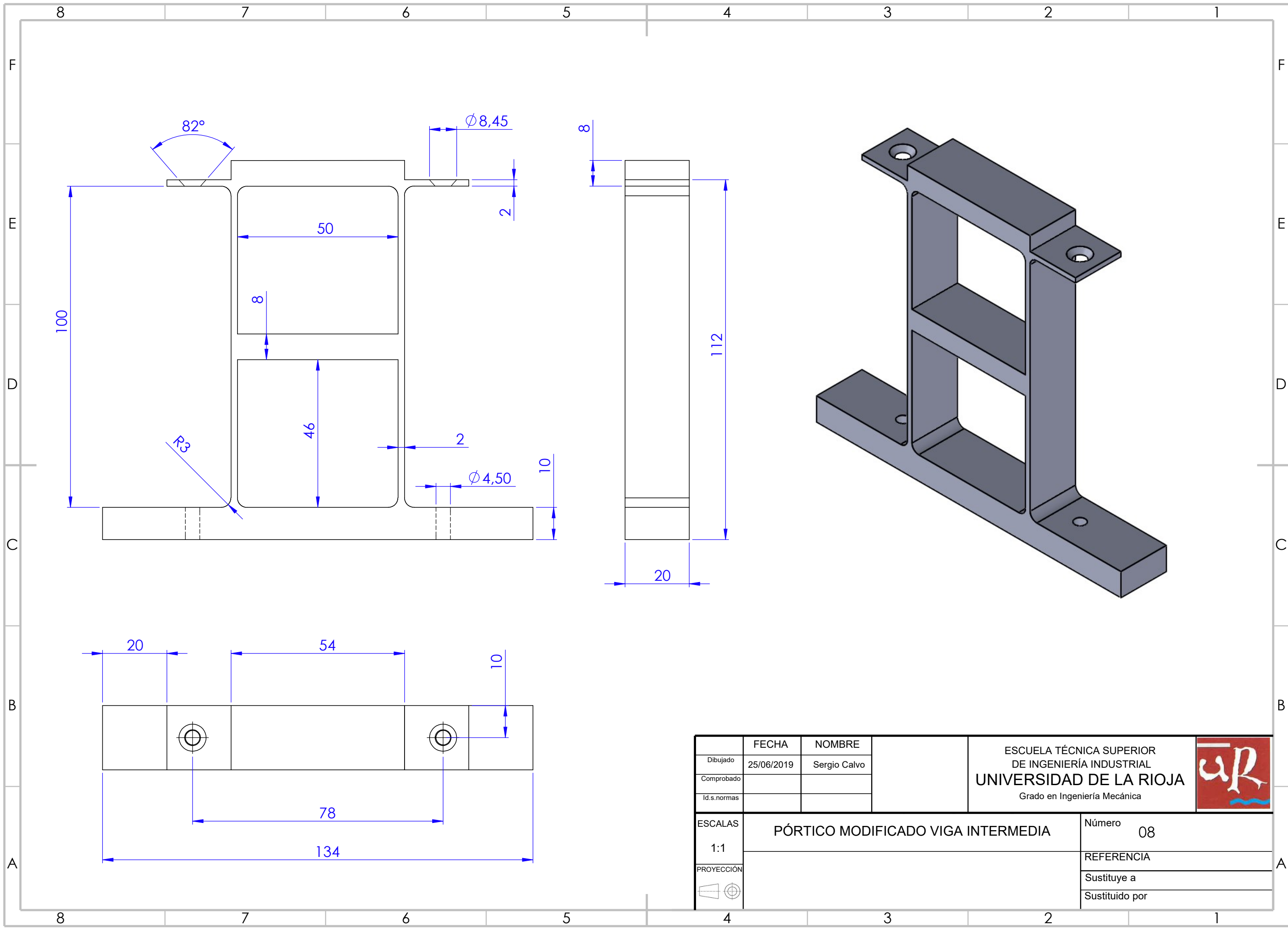
	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	25/06/2019	Sergio Calvo			
Comprobado					
Id.s.normas					
ESCALAS	PÓRTICO 100 x 02			Número 03	
1:1				REFERENCIA	
PROYECCIÓN	Sustituye a				
	Sustituido por				

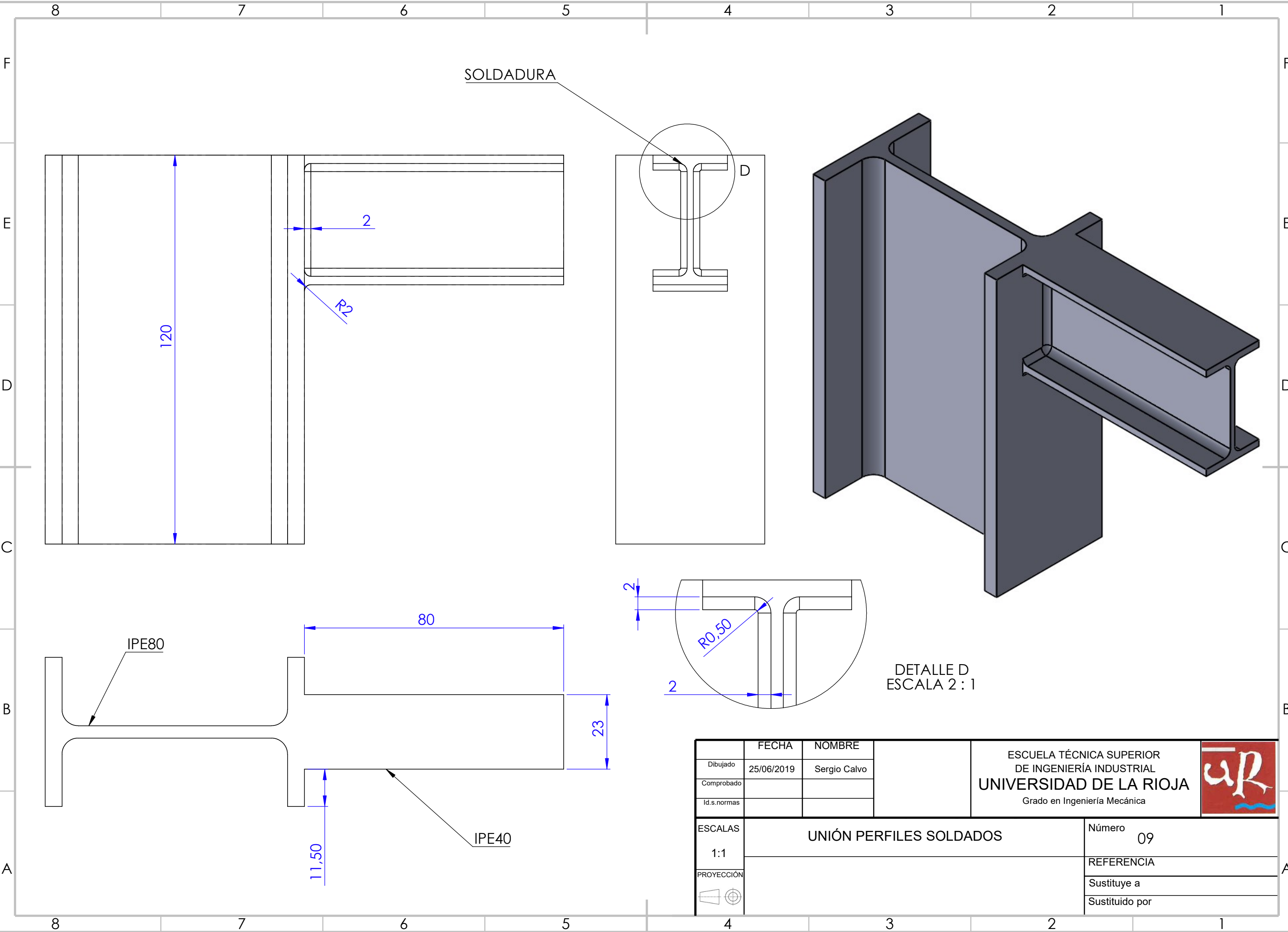



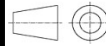


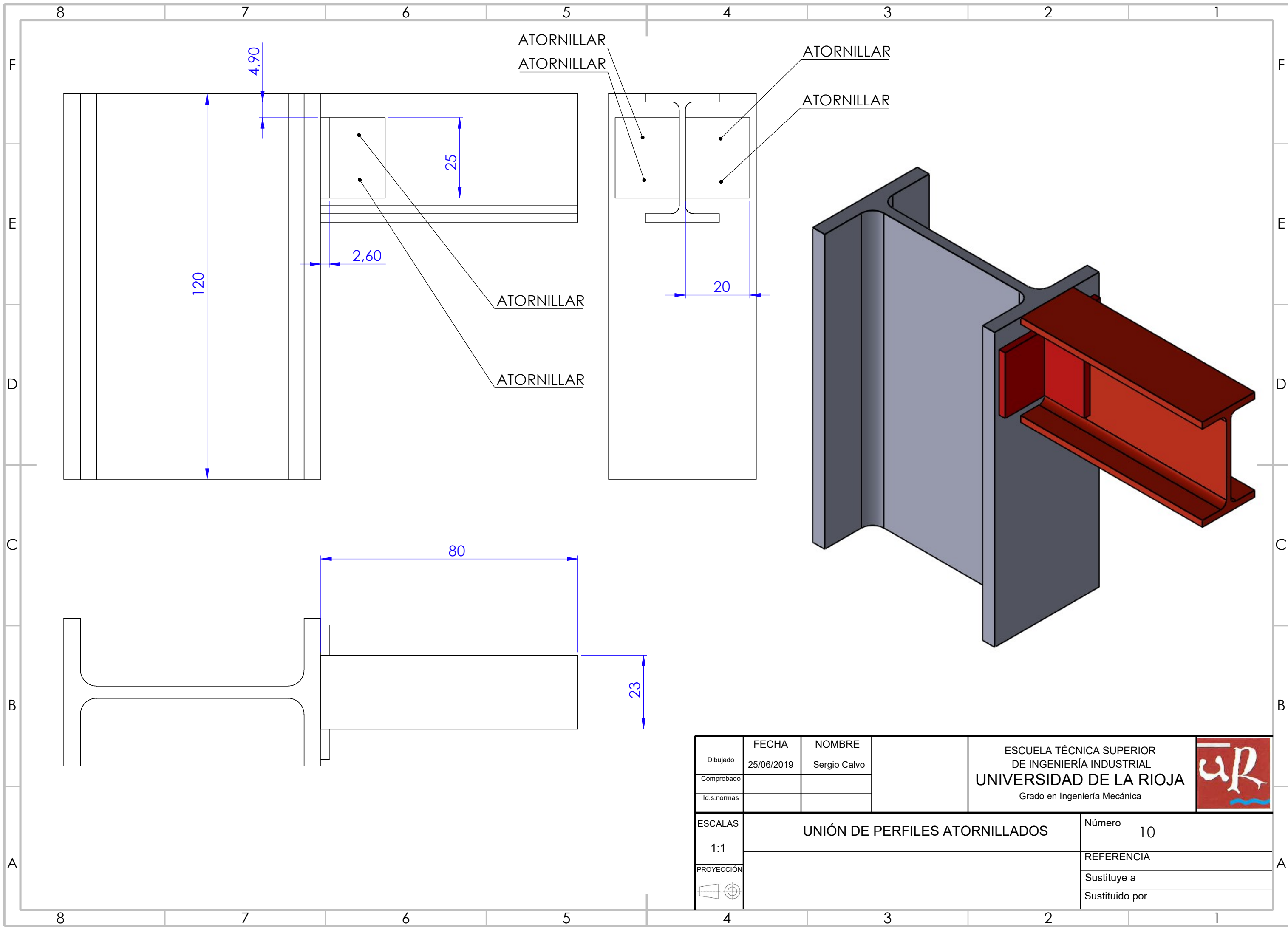




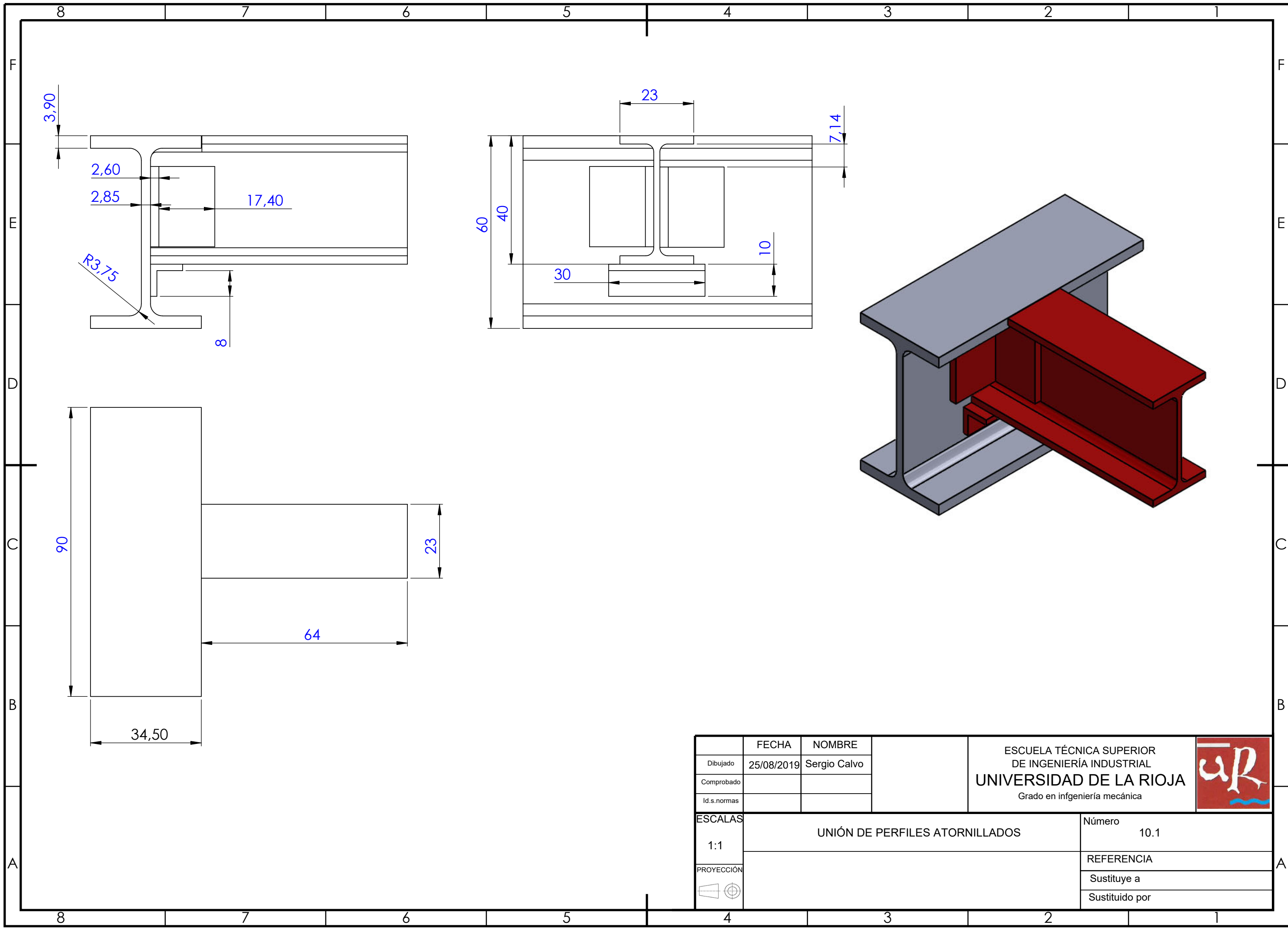






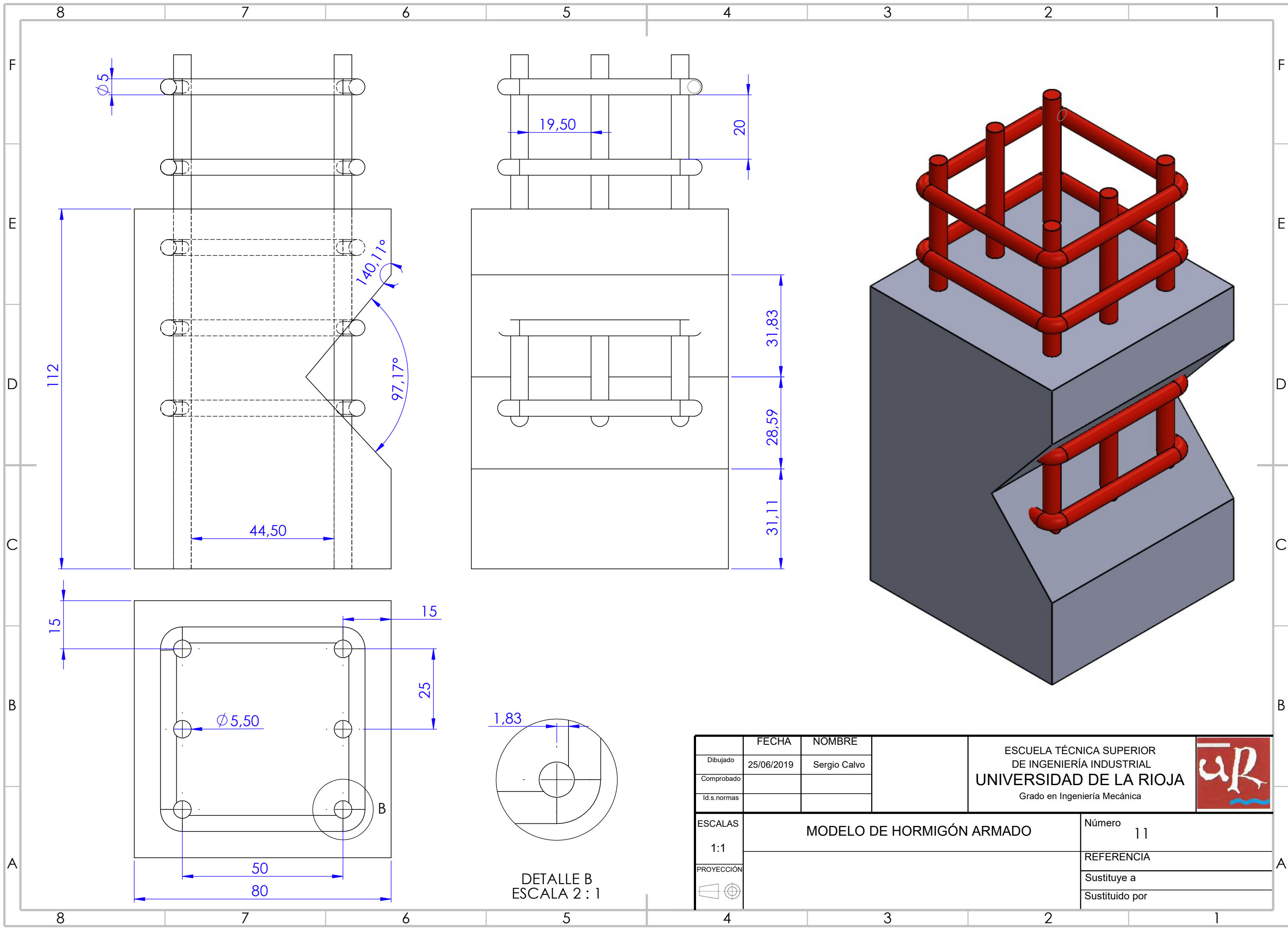
	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	25/06/2019	Sergio Calvo			
Comprobado					
Id.s.normas					
ESCALAS	UNIÓN PERFILES SOLDADOS			Número	09
1:1					
PROYECCIÓN				REFERENCIA	
				Sustituye a	
				Sustituido por	




	FECHA	NOMBRE	<div>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA</div> <div>Grado en Ingeniería Mecánica</div> <div></div>	
Dibujado	25/06/2019	Sergio Calvo		
Comprobado				
Id. s. normas				
ESCALAS	UNIÓN DE PERFILES ATORNILLADOS			Número 10
1:1				REFERENCIA
PROYECCIÓN				Sustituye a
				Sustituido por



	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en ingeniería mecánica	
Dibujado	25/08/2019	Sergio Calvo			
Comprobado					
Id.s.normas					
ESCALAS	UNIÓN DE PERFILES ATORNILLADOS			Número	10.1
1:1					
PROYECCIÓN				REFERENCIA	
				Sustituye a	
				Sustituido por	



	FECHA	NOMBRE	<div>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA</div> <div>Grado en Ingeniería Mecánica</div> <div></div>	
Dibujado	25/06/2019	Sergio Calvo		
Comprobado				
Id.s.normas				
ESCALAS	MODELO DE HORMIGÓN ARMADO			Número 11
1:1				REFERENCIA
PROYECCIÓN				Sustituye a
				Sustituido por

MEDICIONES Y PRESUPUESTO

Trabajo Fin de Grado

Sergio Calvo Simón

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Proyecto estructuras 3D

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD
C02	Diseños y manipulación de archivos					
E01	h Horas de diseño SolidWorks					30,00
E02	h Horas de Slic3r					15,00
E03	h Horas de Ultimaker					5,00

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Proyecto estructuras 3D

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD
C03	Tiempo de impresión					
E04	h Puesta a punto de impresora					5,00
E05	h Carga de filamento					2,00
E06	Energía para impresión					5,00
E07	h Mantenimiento					4,00

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Proyecto estructuras 3D

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD
C04	Tiempo de ensayos en Laboratorio					
E08	h	Ensayos en Lab				30,00

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Proyecto estructuras 3D

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD
C05	Materiales					
E09	h PRUSA					1,00
E10	kg Filamento					1,20
E11	u Calibre Reloj					1,00
E12	u Sargentos					2,00
E13	u Pesas y soporte					1,00

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Proyecto estructuras 3D

CAPÍTULO	RESUMEN	IMPORTE	%
C02	Diseños y manipulación de archivos.....	1.980,00	52,03
C03	Tiempo de impresión.....	329,00	8,64
C04	Tiempo de ensayos en Laboratorio	360,00	9,46
C05	Materiales	1.136,80	29,87
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL		3.805,80	
21% IVA		799,22	
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN		4.605,02	

Asciende el presupuesto a la expresada cantidad de CUATRO MIL SEISCIENTOS CINCO EUROS con DOS CÉNTIMOS

, 2 de Julio 2019.